

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Martin Stárek

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

CNC frézka pro výrobu plošných spojů

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin Stárek**
Osobní číslo: **I22030**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **CNC frézka pro výrobu plošných spojů**
Zadávající katedra: **Katedra automatizace a matematiky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je konstrukce CNC frézky pro výrobu plošných spojů metodou frézování. Konstrukce CNC frézky bude vycházet z konstrukcí standardních CNC strojů, jejichž dílčí řešení budou tvořit základ návrhu vlastní konstrukce stroje. Ke konstrukci CNC stroje budou použity standardní, komerčně dostupné, komponenty a moduly, doplněné o moduly vycházející z vlastního návrhu a jejich realizace.

Teoretická část práce bude obsahovat řešení zadaného tématu se zaměřením na technologii výroby plošných spojů frézováním a konstrukčnímu řešení CNC strojů pro tuto technologickou oblast. Součástí teoretické části bude i popis postupu přípravy a generování vstupního frézovacího kódu CNC stroje. Výsledky řešení budou následně použity jako základ návrhu vlastního konstrukčního řešení CNC stroje. Praktická část práce bude obsahovat vlastní návrh konstrukčního řešení CNC frézky, popis její realizace a testování. Základem řídicí jednotky zařízení bude zvolený typ jednočipového mikropočítače, např. řady Atmega, fy Microchip. Je možné použít mikropočítačový modul, osazený tímto typem mikropočítače, doplněný o příslušné funkční moduly.

Součástí práce bude i podrobná výrobní dokumentace realizované konstrukce, v podobě kompletního 3D modelu, vytvořeného v prostředí CAD software a podrobný uživatelský návod. Firmware mikropočítače řídicí elektroniky CNC frézky bude umístěn v podobě zdrojového a zkompilevaného kódu v elektronické příloze práce.

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4
ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4
MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**
Katedra automatizace a matematiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Libor Kupka, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2025

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem CNC frézka pro výrobu plošných spojů jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 5. 5. 2025

Martin Stárek

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mě během studia a při zpracování této bakalářské práce podporovali. Mé upřímné poděkování patří vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a ochotu, kterou mi po celou dobu věnoval.

Dále děkuji své rodině a blízkým, jmenovitě mé mamince, Marianě Stárkové, za nepřetržitou podporu, ať už finanční, či psychickou, po celou dobu studia, a zejména při psaní této práce. Poděkování patří také Martinu Hrodkovi za cenné rady a pomoc v průběhu studia a všem mým spolužákům za soudržnost a vzájemnou podporu.

Anotace

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí CNC frézky na výrobu plošných spojů. Nejprve rozebírá teorii CNC zařízení, následně konstrukci a v poslední řadě vlastní návrh z komerčně dostupných modulů.

Klíčová slova

CNC, frézování, výroba DPS, mikrokontroler

Title

CNC Milling Machine for PCB Manufacturing

Annotation

This project focuses on the design and construction of a CNC milling machine for printed circuit board (PCB) production. It first discusses the theory behind CNC devices, then the mechanical construction, and finally presents a custom design based on commercially available modules.

Keywords

CNC, milling, PCB manufacturing, microcontroller

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam ilustrací	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Historie CNC	12
1.1 Využití.....	13
1.1.1 Tvarovací stroje.....	13
1.1.2 Dělicí stroje	14
1.2 Pohyb CNC	15
1.2.1 Třiosé zařízení.....	15
1.2.2 Čtyřosé zařízení.....	15
1.2.3 Pětiosé zařízení	16
1.3 Výhody/nevýhody	16
2 Konstrukce CNC	17
2.1 Nosná konstrukce a osy.....	17
2.2 Pohon os	18
2.3 Krokové motory	18
2.4 Motor drivery	20
2.5 Řídící jednotka	22
2.6 Nástroj.....	23
2.7 Výroba DPS frézováním	24
2.8 Jiné metody výroby DPS.....	25
3 Software CNC	26
3.1 SW řídicí jednotky	26
3.2 G Kód.....	27
4 GRBL	28
5 Software pro komunikaci s CNC	28
5.1 Sériová komunikace	28
5.2 Struktura a řízení komunikace	29
6 Cílené parametry	30
7 Skutečná konstrukce CNC	31
7.1 Hrubá konstrukce	31

7.2 Elektronika řídicí jednotky.....	33
7.3 Osy a jejich pohyb.....	35
7.3.1 Krokové motory	35
7.3.2 Závitové tyče se šroubovou maticí a vodící tyče	36
7.3.3 Nástroj.....	37
7.3.4 Ložisko.....	38
7.3.5 Spojovací materiál.....	38
7.3.6 3D modely držáků na osách.....	39
7.4 Software	42
7.4.1 Software řídicí jednotky.....	43
7.4.2 Komunikační software s řídicí jednotkou	43
7.4.3 Nastavení parametrů řídicí jednotky	44
8 Návod k obsluze.....	46
9 Schéma zapojení a jeho komponenty	50
9.1 Blokové schéma zapojení.....	50
9.2 Seznam komponent	50
10 Finální 3D modely	51
Závěr	53
Použitá literatura	56
Přílohy.....	60

Seznam zkratek

NC	Numerical Control
CNC	Computer Numerical Control
DPS	Deska Plošných Spojů
UGS	Universal G-Code Sender
GRBL	G-Code Reference Block Library
UV	Ultra Violet
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused Depositin Modeling
SLA	Stereolithography
GND	Ground
RX	Reception
TX	Transmission
SW	Software

Seznam ilustrací

Obrázek 1 - Dobová fotografie NC stroje [1]	12
Obrázek 2 - Moderní CNC soustruh [3].....	13
Obrázek 3 – Foto lakovacího robota[38]	14
Obrázek 4 – Foto 3D tiskárny[37]	14
Obrázek 5 - Detailní fotografie laserové řezačky [4].....	14
Obrázek 6 - Foto stolní frézy na měkké materiály [5]	14
Obrázek 7 - Třiosé zařízení s popisem os [7].....	15
Obrázek 8 - Foto ozubeného řemenu[39]	17
Obrázek 9 - Foto ozubené řemenice [40].....	17
Obrázek 10 - Závitová tyč s trapézovou maticí [12]	18
Obrázek 11 - Bipolární vinutí krokového motoru [13]	19
Obrázek 12 - Unipolární vinutí krokového motoru [13].....	19
Obrázek 13 - Krokový motor Nema 17 Bipolar 55Ncm [14]	20
Obrázek 14 - Průběh proudů při půlkokovém řízení [15].....	20
Obrázek 15 - Průběh proudů při 1/4 krokování [15].....	21
Obrázek 16 - Blokové schéma řídicí jednotky [Autor].....	23
Obrázek 17 - Vrtáky pro výrobu DPS o různých velikostech [19].....	24
Obrázek 18 - Fotografie procesu osvětlování přes fotomasku [22].....	25
Obrázek 19 - Fréza pro výrobu DPS laserem [24].....	26
Obrázek 20 - Příklad G kódu [25].....	27
Obrázek 21: Foto kódu [27]	29
Obrázek 22 - Fotografie použitého profilu[Autor]	32
Obrázek 23 - 3D model plastové spojky[Autor]	32
Obrázek 24 - Kovová spojka použita při konstrukci[Autor].....	32
Obrázek 25 - Fotografie hrubé konstrukce[Autor]	33
Obrázek 26 - Fotografie kontaktního snímače[Autor].....	35
Obrázek 27 - Fotografie závitové tyče[Autor].....	36
Obrázek 28 - Fotografie spojky motoru a závitové tyče[Autor].....	38
Obrázek 29 - Finální 3D model pracovní plochy [Autor].....	40
Obrázek 30 - Finální 3D model držáku pro vřeteno [Autor]	42
Obrázek 31 - Snímek Toolboxu v programu UGS [Autor]	47
Obrázek 32 - Snímek Jog Controlleru v programu UGS [Autor]	48
Obrázek 33 - Blokové schéma zapojení celého zařízení[Autor].....	50
Obrázek 34 - Finální 3D model kompletního zařízení [Autor].....	51
Obrázek 35 - Finální 3D model osy Y [Autor]	51
Obrázek 36 - Finální 3D model osy X [Autor]	52
Obrázek 37 - Finální 3D model osy Z [Autor].....	52
Obrázek 38 - Finální podoba kompletního zařízení [Autor].....	54
Obrázek 39 - Finální vzhled osy Y [Autor]	54
Obrázek 40 - Finální vzhled osy X [Autor]	55
Obrázek 41 - Finální vzhled osy Z [Autor].....	55

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Tabulka s cílenými parametry	31
Tabulka 2 - Seznam použitých součástí a komponent	50
Tabulka 3 - Tabulka s dosaženými parametry	53

Úvod

Automatizace výrobních procesů je dnes neoddělitelnou součástí moderní průmyslové výroby. CNC technologie (Computer Numerical Control) představují klíčový nástroj pro zajištění přesnosti, opakovatelnosti a efektivity při obrábění různých materiálů. Jejich význam neustále roste nejen ve velkých výrobních podnicích, ale také v oblasti malých prototypových dílen a domácích hobby aplikací.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh a konstrukci vlastní CNC frézky určené pro výrobu plošných spojů (DPS). Cílem práce bylo navrhnout zařízení s dostatečnou přesností a spolehlivostí, které bude sestaveno z běžně dostupných modulů a komponent, čímž bude zároveň cenově dostupné pro širší okruh uživatelů.

V teoretické části je nejprve uveden přehled vývoje a principů CNC systémů, včetně popisu různých typů konstrukcí, použitých motorů, řídicích jednotek a používaného softwaru. Následuje část věnovaná návrhu konkrétního zařízení, jeho mechanickému řešení, výběru vhodných komponent a způsobu řízení. Praktická část se pak věnuje samotné realizaci frézky, kalibraci, nastavení řídicího softwaru a vyhodnocení funkčnosti zařízení při výrobě DPS.

Výsledkem práce je plně funkční CNC frézka schopná samostatné výroby jednoduchých plošných spojů, která může sloužit jako základ pro další rozšíření nebo jako inspirace pro jiné projekty v oblasti automatizovaného řízení a výroby.

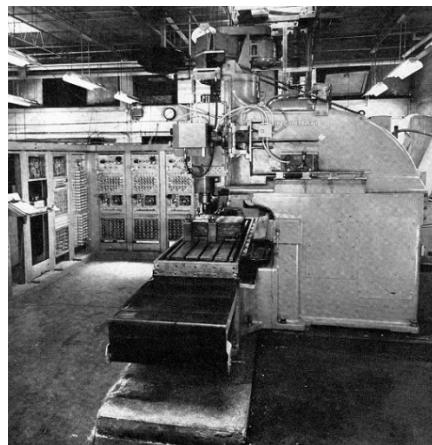
1 Historie CNC

Abychom pochopili, co je to CNC stroj, musíme nejprve rozebrat takzvané NC stroje. NC stroje, z anglického spojení Numerical Control, byla mechanická zařízení, které kombinovala mechanické komponenty a numerické řídicí systémy. Byly následníky manuálních obráběcích strojů, výrazně zlepšily přesnost a rychlost obrábění. Děly se na dva základní druhy.

- Dělicí stroje – Specializované na odstraňování materiálu pro dosažení požadovaného výsledku
- Tvarovací stroje – Materiál tvarovaly ať působením síly, jako lisy, nebo přidáváním materiálu, jako lakovací roboty

Původně se NC systémy využívaly primárně pro frézování, ale postupně se rozšířily na široké spektrum obráběcích a výrobních operací, včetně soustružení, vrtání a elektroerozivního obrábění. Přesnost NC strojů zajišťovaly servomotory řízené programovými instrukcemi, které ovládaly pohyb nástrojů. První generace NC strojů, tzv. Hardwired NC, využívala pevně zapojené elektronické obvody, jako byly tranzistory, vakuové trubice a relé, k řízení jejich funkcí. Tyto stroje neměly programovatelnou logiku a jakákoliv změna operace vyžadovala fyzickou úpravu obvodů.

S rozvojem polovodičů a mikroprocesorů v 60. a 70. letech vznikly Softwired NC stroje, které umožňovaly flexibilnější řízení a přizpůsobení procesů prostřednictvím softwaru. Tento vývoj vedl k nástupu CNC (Computer Numerical Control), kde programy plně řídí obrábění pomocí digitálního softwaru namísto pevně zapojených obvodů. To umožnilo vyšší přesnost, rychlost a snadnější úpravy výrobních procesů. Na následující obrázku můžeme pro představu vidět, jak vypadal NC stroj.



Obrázek 1 - Dobová fotografie NC stroje [1]

CNC (Computer Numerical Control) stroje jsou moderní obráběcí systémy, které využívají počítačové řízení k automatizaci přesných výrobních procesů. Oproti původním NC strojům, které byly řízeny pevně zapojenými elektrickými obvody, CNC stroje využívají softwarově programované instrukce, což umožňuje flexibilnější, rychlejší a přesnější obrábění. Fyzicky

se CNC stroj skládá z několika hlavních částí: Rám stroje, nástroj, lineární vedení a jeho řízení, řídicí jednotka atd.

Díky této struktuře jsou CNC stroje vysoce přesné a schopné automaticky vykonávat složité výrobní operace podle předem naprogramovaných pokynů. O jejich konkrétním využití a možnostech se budeme podrobněji zabývat v následujících částech. Na následujícím obrázku můžeme vidět příkladné moderní CNC. Jedná se o CNC soustruh. [2]



Obrázek 2 - Moderní CNC soustruh [3]

1.1 Využití

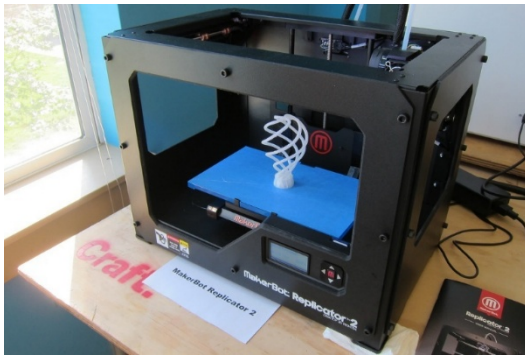
Technologie CNC není vázaná na určitý druh zařízení. Využití pro toto zařízení určuje nástroj, který je upevněn na osách. Výše byly rozebrány dělicí a tvarovací stroje, následně budou ve zkratce rozebrány tvarovací stroje, poté v rozsáhleším měřítku dělicí stroje, protože jsou pro naši aplikaci relevantnější.

1.1.1 Tvarovací stroje

Tvarovací stroje jsou tedy zařízení, která materiál tvarují, aplikují, nebo přidávají. Jeden z příkladů je 3D tiskárna. Principem aditivní výroby přidává materiál vrstvu po vrstvě a tím skládá finální produkt. Existuje více druhů, FDM, které taví tenké plastové vlákno a vrstvu po vrstvě v prostoru skládá produkt, SLA, které zase vytvrzují tenkou pryskyřici pomocí UV laseru a SLS, které spékají práškové materiály laserem. Přestože každý typ tiskárny používá jinou technologii, všechny je spojuje CNC řízení, při kterém řídicí jednotka zpracuje instrukce v podobě G Kódu, a tím manipuluje nástrojem. Tyto tiskárny se využívají v prototypování, modelářské práce i průmyslové výrobě, včetně produkce funkčních součástí z plastů, kovů a kompozitních materiálů.

Pro nanášení materiálu, zejména v průmyslu, se používají lakovací roboti. Automatizovaným procesem nanáší tryskou vrstvy laku po celé ploše objektu. Lakovací roboti fungují na základě předem naprogramovaných instrukcí, obvykle ve specializovaném robotickém programovacím jazyce nebo pomocí G-kódu v některých případech. Tito roboti

umožňují rovnoměrné a opakovatelné nanášení laku i do složitých míst a záhybů, což by bylo ruční prací náročné. [2]



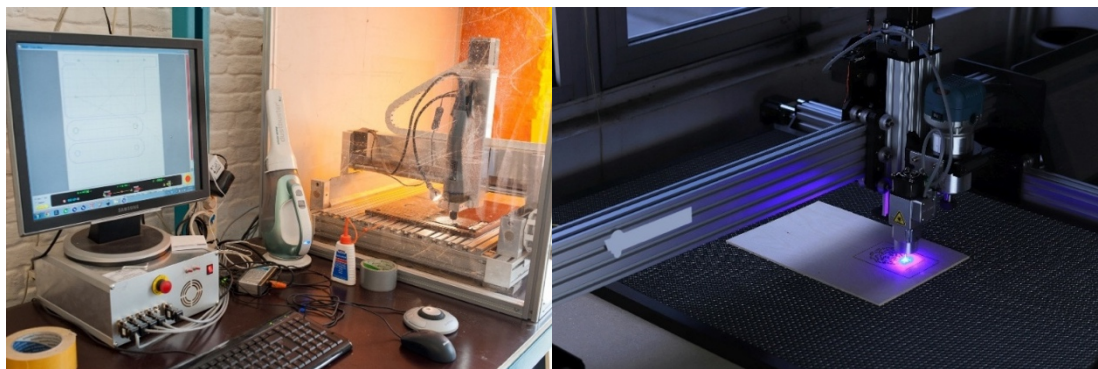
Obrázek 4 – Foto 3D tiskárny[37]



Obrázek 3 – Foto lakovacího robota[38]

1.1.2 Dělicí stroje

Dělicí stroje naopak materiál ubírají, například broušením, frézováním nebo vrtáním odebírají hmotu, čímž vytvářejí požadovaný tvar. Nejčastěji používané jsou frézky, soustruhy laserové a vodní rezačky. Každý z těchto strojů využívá jiný princip řezání, ale všechny spojuje to stejné, CNC řízení. Řídící jednotka zpracovává předem naprogramované instrukce a ovládá pohyb nástroje s vysokou přesností a efektivitou. Jeden z nejrozšířenějších CNC strojů je fréza. Její princip spočívá v tom, že rotující řezný nástroj, vrták, postupně odebírá vrstvy materiálu z polotovaru a tím formuje finální výrobek. Existuje více druhů, tříosé, pětiosé, které umožňují složitější obrábění díky širšímu rozsahu pohybu. Hojně se používají ve strojírenství a průmyslu, mimo jiné také pro výrobu DPS. Pro bezkontaktní řezání se používají laserové CNC rezačky, které pomocí koncentrovaného světelného paprsku dokáží precizně vypálit výrobek do polotovaru a tím efektivně získat požadovaný tvar výrobku. Disponuje vysokou přesností, díky tenkému řezu, a rychlostí řezu, což je činí ideální pro zpracování plechů, dřeva, a jiných měkkých materiálů. [2]



Obrázek 5 - Detailní fotografie laserové rezačky [4]

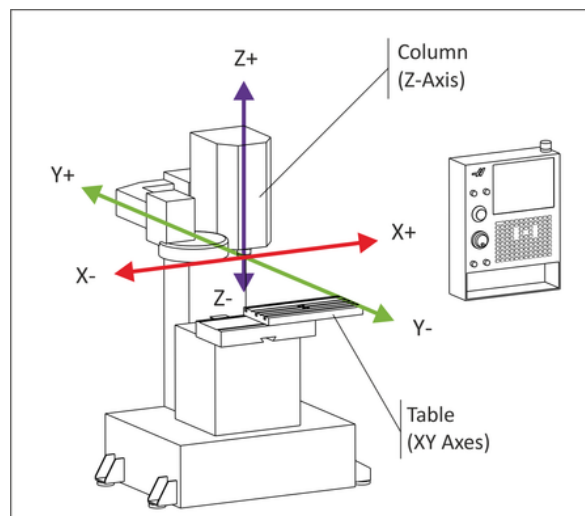
Obrázek 6 - Foto stolní frézy na měkké materiály [5]

1.2 Pohyb CNC

Pro pochopení pohybu CNC nejprve musíme rozebrat osy CNC. Teoreticky může mít CNC minimálně dvě osy, maximálně kolik je potřeba. Nástroj se poté pohybuje pouze ve směru os, díky různým algoritmům řídicí jednotky CNC je schopno dělat například plynulé pohyby diagonálně kombinací pohybů dvou os, co jsou na sebe kolmé. Osy se označují písmeny, základní dvě jsou X a Y. Pokud stojíme před dvouosou frézku, osa X se pohybuje zleva doprava k našemu referenčnímu bodu. Osa Y dělá pohyb kolmý, tedy zepředu dozadu. [6]

1.2.1 Tříosé zařízení

Dvouosé zařízení je prakticky nepoužitelné, častější jsou tříosá zařízení, kde třetí osa Z, slouží k horizontálnímu pohybu nástroje. Pokud tedy dodržíme referenční bod, který jsme si stanovili na začátku, pohybuje se nástroj nahoru a dolů. Jsou rychlé a efektivní pro odstraňování materiálů, tedy pro vytváření rovných povrchů a vrtání. Zaoblené pohyby jsou možné, ale značně nepraktické a není možné například vrtat pod úhlem. Toto omezení lze eliminovat, pokud obrábění zastavíme a změním polohu obrobku. Musíme mít na paměti, že pokud změním pozici obrobku, nejen natočení, a naše fréza neumí sama znovu zreferencovat obrobek, pro úspěšné dokončení práce bude potřeba přeprogramovat instrukce. Tento proces je však složitý a může vést k rozměrným chybám. Příklad tříosého zařízení můžeme vidět na obrázku níže.[6]



Obrázek 7 - Tříosé zařízení s popisem os [7]

1.2.2 Čtyřosé zařízení

Pro eliminaci této potenciální chyby se přidává další osa s označením A. Jedná se o přidání rotačního pohybu k ose X. Přidáním této osy se nám značně rozšíří možnosti, kde na obrobku ubírat materiál bez nutnosti jakkoli manipulovat s obrobkem mimo proces obrábění. Při kombinaci pohybů z dalších os je možné vytvářet složitější křivky a zaoblené povrchy, efektivně tím můžeme na fréze soustružit. Ovšem fréza není ideální stroj na soustružení, takže operace bude trvat o dost déle, ale je to možné.[6]

1.2.3 Pětiosé zařízení

Podobně jako u čtyřosého zařízení, přidání další osy znamená přidání rotačního pohybu, tentokrát k ose Y. Tato osa se nazývá osa B. Ve speciálních případech lze tohoto zařízení docílit osazením tříosé hlavy. Oproti tříosému zařízení je možné vytvářet značně složitější tvary, jako jsou spirálové rotory. Zařízení vybavena pěti osami jsou velmi finančně náročná a konstrukčně složitá, protože je nutné zajistit nulové vůle na každé z os. [6]

1.3 Výhody/nevýhody

CNC obrábění nabízí řadu významných výhod, které z něj činí ideální volbu pro výrobu vysoce přesných a kvalitních dílů. Díky tomu, že proces je plně automatizovaný, umožňuje velmi krátké dodací lhůty, často do pěti dnů. CNC stroje zvládnou obrábět téměř jakýkoli tvrdý materiál, od hliníku a oceli po technické plasty jako Delrin nebo PEEK, a výsledné díly mají mechanické vlastnosti totožné s výchozím materiálem. Výroba jednotlivých kusů i malých a středních sérií (10–1000 kusů) je ekonomicky výhodná, jelikož nevyžaduje výrobu forem jako u vstřikování plastů. CNC navíc dosahuje vysoké rozměrové přesnosti a těsných tolerancí, standardně $\pm 0,125$ mm, s možností až $\pm 0,025$ mm u kritických prvků. To vše z něj dělá vhodnou technologii pro prototypování, zakázkovou výrobu a technicky náročné aplikace. [8]

Navzdory mnoha přednostem má CNC obrábění i svá omezení. Jedním z hlavních je vyšší cena při složitějších geometriích, protože náročnější tvar vyžaduje použití víceosých strojů nebo manuální přestavování obrobku, což zvyšuje náklady i čas. Dále existují mechanická omezení daná rezným nástrojem, některé vnitřní dutiny, ostré podřezy nebo skryté plochy nelze běžnými nástroji obrobit. Také upevnění obrobku je klíčové, špatné upnutí může vést k vibracím a snížení přesnosti. CNC má rovněž relativně vysoké vstupní náklady, zejména kvůli ručnímu plánování výroby a přípravě programů, což je nevýhodné u velmi malých objemů. Přesto jsou tyto náklady nižší než u technologií, jako je vstřikování, kde je třeba vyrábět drahé formy. [8]

2 Konstrukce CNC

2.1 Nosná konstrukce a osy

Základem kvalitního CNC je promyšlená konstrukce, která zajistí stabilitu, tuhost a přesnost při obrábění. Obecně je dobré se pro nosné části vyhnout měkkým materiálům, jako je plast a podobné, protože pružné a měkké materiály přinesou do konstrukce nestabilitu a pružnost, která má velký vliv na přesnost zařízení. Rám samotné konstrukce bývá z kovových materiálů pospojovaný tak, taky byl bez vůle a jakéhokoli pružení. Nejčastěji se používá hliník, v některých případech i ocel, záleží na druhu a použití samotného CNC. Pokud se jedná o CNC menších rozměrů, pro obrábění měkkých materiálu, kde se nečekají velké vibrace, není důvod stavět velkou bytelnou ocelovou konstrukci, v tomto případě bohatě postačí hliníkový rám. Naopak při obrábění tvrdých kovových materiálů hliník nemusí být dostatečný, takže je vyžadována velká a bytelná konstrukce. V tomto případě bude ocel správná volba. [9]

Pohyb osy poté může být řešen mnoha způsoby. Mezi hlavní, standardní, způsoby patří řemenice a řemeny, nebo závitové tyče. První, ozubené řemenice a řemeny, přenáší pohyb motoru na pohyblivou část stroje tím, že jedna ozubená řemenice je pevně spojena s hřídelí motoru, druhá je na druhém konci osy tak, aby se mezi ně mohl nahnout řemen. Řemen bývá z polyuretanu nebo pryže s příměsí kevlarových nebo ocelových vláken pro zvýšení pevnosti. Požadovaná pohyblivá část je pevně spojena s řemenem pevnou spojkou nebo svorkou. Řemenice na motoru může následně pohybovat řemenem a tím celým ústrojím. Výhodou je jednoduchost, tichý chod, nižší náklady a absence vůle, při správném napnutí řemene. Z pohledu konstrukce bývá standardně jedna řemenice řídící pohyb a druhá takzvaně napínací, která řemen drží co nejvíce napnutý. S tím přichází velká nevýhoda, a to je nutná údržba, kontrolovat řemen, zda není porušený a je napnutý. Řemeny jsou také méně přesné a nejsou vhodné pro vysoké zatížení, které může způsobit přerušování řemenu nebo přeskokování zubů. Na následujících obrázcích můžeme vidět nejprve ozubené řemenice z oceli a hliníku a na dalším ozubený řemen. [10; 11]



Obrázek 9 - Foto ozubené řemenice [40]



Obrázek 8 - Foto ozubeného řemenu [39]

Trapézové tyče slouží k převodu rotačního pohybu na lineární, tedy opět, rotaci motoru na pohyb pohyblivého prvku po ose. Jedná se o kovovou tyč, která je opatřena trapézovým závitem (závit ve tvaru lichoběžníku) po celé délce. Spolupracuje s takzvanou trapézovou maticí. Tyč je pevně spojena pružnou spojkou s hřídelí motoru, druhá strana tyče je zasazena do ložiska. Matice je spojena s pohybovým ústrojím tak, aby bylo zamezeno jejímu otáčení při rotaci tyče. Následným otočením motoru se otočí také trapézová tyč, což způsobí pohyb matice. Tím se pohne celé pohybové ústrojí. Výhodou tohoto řízení je pevnost a tuhost, jednoduchá konstrukce a dostatečná přesnost pro CNC aplikace. Nevýhodou je hlučnost při rychlých pohybech, tření a opotřebení. V rámci údržby tedy vyžadují promazat, jinak mohou vznikat nežádoucí vůle.[10; 11]



Obrázek 10 - Závitová tyč s trapézovou maticí [12]

2.2 Pohon os

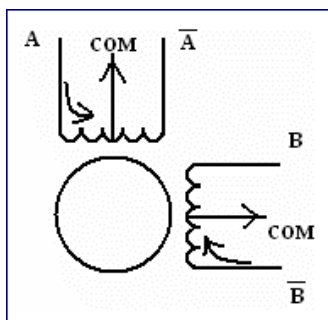
Pro pohon os se používají stejnosměrné motory. Teoreticky je možné použít jakýkoli typ motoru, od obyčejných stejnosměrných motorů, přes servomotory až po krokové motory. Poslední zmíněné jsou pro tuto aplikaci nejvhodnější a používají se nejčastěji, protože se u nich dá snadno sledovat jejich pohyb bez použití různých enkodérů a jiných příslušenství, což je pro CNC stěžejní.

2.3 Krokové motory

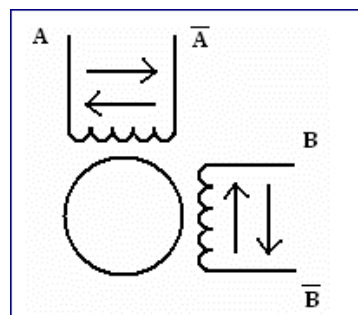
Krokové motory, někdy také označovány jako digitální motory, jsou indukční synchronní točivé stroje. Obecně jde o motory, které díky impulzům na vinutí dokážou stator posouvat o takzvané kroky, tedy malé, pevně dané pohyby jedním směrem. Velikost kroku (úhel natočení) je dán konstrukcí motoru a generovaným řídicím impulsem. Z pohledu konstrukce se dělí na více druhů, ty si následně rozebereme. [13]

Podle způsobu vinutí se dělí na unipolární a bipolární. Unipolární motory mají ze středu každé fáze vyvedený středový vývod, čímž vzniknou dva segmenty na každém vinutí. Tento střed se většinou připojuje na napájecí větev a zbylé konce se přes tranzistory, nebo jiné spínací prvky, připojují na zem, čímž se dá jednoduše řídit směr otáčení. Nevýhodou je, že využita je vždy jen polovina cívky, což znamená menší efektivitu a nižší výkon. Bipolární motory mají již vinutí celistvé, cívka tedy nemá žádnou odbočku.

V provozu je vždy celá cívka, proud je lépe využitý v celé cívce, což maximalizuje výkon a točivý moment a efektivitu. Nevýhodou je, že pro řízení je potřeba složitější elektronika (H můstky), stoupají tedy náklady. [13]



Obrázek 12 - Unipolární vinutí krokového motoru [13]



Obrázek 11 - Bipolární vinutí krokového motoru [13]

Podle počtu vinutí se dělí na dvoufázové a vícefázové. Dvoufázové jsou nejpoužívanější, jak již název vypovídá, mají dvě vinutí. Pro většinu aplikací je to dostačující, jsou tedy jednodušší na ovládání a levnější. Vícefázové mají tři a více vinutí. Díky tomu dokážou zajistit jemnější krok a také menší vibrace při pohybu. Nevýhodou je složitější konstrukce, která zvyšuje komplexnost řízení a zvyšuje cenu. [13]

Podle konstrukce rotoru se dělí na reluktanční, motor s permanentními magnety a hybridní. Reluktanční motory fungují na principu minimalizace reluktance (magnetického odporu). Na rotoru tohoto motoru, se nachází zuby z feromagnetického materiálu. Na statoru jsou vinutí, která jsou rozmístěna tak, aby vždy seděl jen jeden zub na jedno vinutí. Jakmile tímto vinutím začne procházet proud, rotor se snaží minimalizovat magnetický odpor, reluktanci, takže se natočí tak, aby zub nejbližší k aktivnímu vinutí byl zarovnaný s jeho magnetickým polem. Opakovaným zapínáním a vypínáním cívek tedy docílíme plynulého pohybu, i když v podstatě „krokuje po jednotlivých zubech“.

Motor s permanentními magnety funguje obdobně. Po obvodu statoru jsou rozmístěny cívky, pod kterými jsou malé zoubky z feromagnetického materiálu, které při aktivaci vinutí podpoří její magnetické pole. Rotor se skládá z permanentních magnetů, které jsou uspořádány do několika pólů. Střídavě severní a jižní pól. Při aktivaci vinutí cívka začne vytvářet magnetické pole, které se malými zoubky na statoru dostanou k blízkosti rotoru. Permanentní magnety rotoru začnou reagovat na magnetické pole těchto zoubků tak, aby opačné magnetické póly byly co nejbližší u sebe, tedy severní pól rotoru se natočí k jižnímu pólu statoru a naopak. Střídavým zapínáním těchto cívek tedy docílíme krokového pohybu. Hybridní motor v sobě kombinuje funkci obou výše zmíněných. Z reluktančního motoru přebírá princip minimalizace magnetického odporu a z motoru s permanentním magnetem si přebírá permanentní magnetické pole rotoru. Berou si tedy to nejlepší z obou konstrukcí, právě kvůli tomu jsou nejpreciznější a nejvýkonnější mezi krokovými motory. [13]

Příklad hybridního bipolárního krokového motoru s dvoufázovým vlnutím můžeme vidět na obrázku níže.

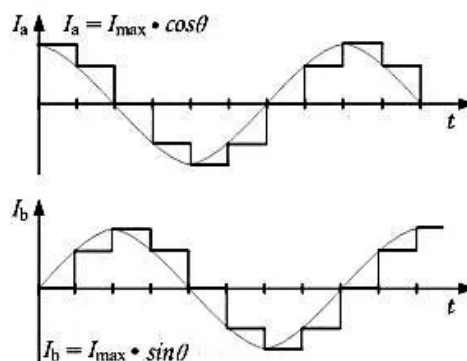


Obrázek 13 - Krokový motor Nema 17 Bipolar 55Ncm [14]

2.4 Motor drivery

Krokové motory lze řídit několika základními způsoby, které se liší především svou složitostí, přesností a plynulostí pohybu. Nejjednodušší metodou je tzv. plnokrokové řízení, kdy se cívky krokového motoru postupně zapínají po jednotlivých celých krocích. Tento způsob řízení je sice jednoduchý, ale způsobuje největší vibrace a je méně přesný. Druhou variantou je polokrokové řízení, které střídá zapnutí jedné a poté dvou cívek současně. Tím dochází ke zmenšení kroku o polovinu a pohyb motoru je plynulejší a přesnější, přesto však stále může docházet k vibracím a rezoncím. [15]

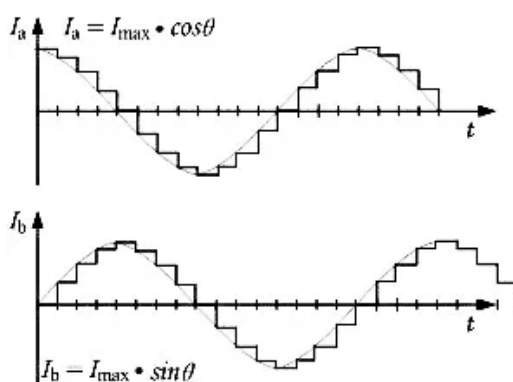
Následující graf znázorňuje časový průběh fázových proudů I_a a I_b při půlkrokovém řízení bipolárního krokového motoru. V tomto režimu se střídá buzení jedné fáze (single-phase excitation) a obou fází zároveň (dual-phase excitation), čímž dochází ke zmenšení krokového úhlu na polovinu. Tato kombinace způsobí, že rotor se pohybuje nejen mezi základními polohami plného kroku, ale i do mezilehlých pozic. Proudové vektory tak během jednoho cyklu rozdělí kruh na osm částí, což zvyšuje rozlišení polohy a snižuje vibrace při nízkých otáčkách. Ačkoli výsledný krouticí moment není zcela konstantní, tento způsob řízení poskytuje kompromis mezi jednoduchostí implementace a zlepšením mechanické plynulosti chodu motoru. [15]



Obrázek 14 - Průběh proudů při půlkrokovém řízení [15]

Nejpokročilejším způsobem řízení krokových motorů je tzv. mikrokrokování. Princip mikrokrokování spočívá v jemném dělení základního kroku motoru prostřednictvím plynulého řízení proudu cívek. Toho se dosahuje postupnou změnou velikosti proudu v jednotlivých fázích motoru. Výsledkem je extrémně jemný, plynulý pohyb s minimalizovanými vibracemi a hlukem, což umožňuje dosáhnout velmi vysoké přesnosti a stability polohy rotoru. [15]

Následující graf znázorňuje průběh fázových proudů při mikrokrokovém řízení krokového motoru se čtyřnásobným dělením plného kroku. Proud ve fázích I_a a I_b je řízen v jemných diskrétních úrovních tak, aby se co nejvíce přiblížil ideálním sinusovým průběhům. Díky tomu se mění výsledná síla působící na rotor plynule a s malými kroky, což umožňuje jemnější polohování a výrazné snížení vibrací a hluku při nízkých rychlostech. Mikrokrokování zajišťuje hladší chod motoru a jemnější krokové úhly, než při plném nebo půlkrokovém řízení. Přestože vyšší počet dělení teoreticky zlepšuje plynulost, praktický rozdíl mezi např. 8 a 16 mikrokroky je již zanedbatelný. [15]



Obrázek 15 - Průběh proudů při 1/4 krokování [15]

Pro praktickou realizaci těchto metod řízení se používají speciální elektronické obvody, tzv. motor drivers, jako například A4988, který je popsán v kapitole o elektronice řídicí jednotky, nebo třeba DRV8825. Motor driver je elektronická jednotka, která na základě signálů od řídicí jednotky (například mikrokontroler nebo CNC řídicí jednotka) přesně ovládá proud v cívkách motoru. Motor drivers většinou obsahují tranzistory zapojené do můstkového zapojení (typicky H-můstky u bipolárních motorů), díky čemuž mohou měnit směr toku proudu v cívkách motoru a regulovat jeho velikost. Tím umožňují motoru provádět pohyby dle zadaného vzoru krokování. [15]

Moderní motor drivers mají možnost nastavit režim krokování, od plného kroku, přes polo krok až po velmi jemné mikrokroky, například 1/8, 1/16, 1/32, nebo dokonce až 1/256 základního kroku motoru. Vyšší míra mikrokrokování znamená plynulejší a tišší pohyb, ovšem s požadavkem na složitější elektroniku a přesnější řízení proudu. [15]

2.5 Řídicí jednotka

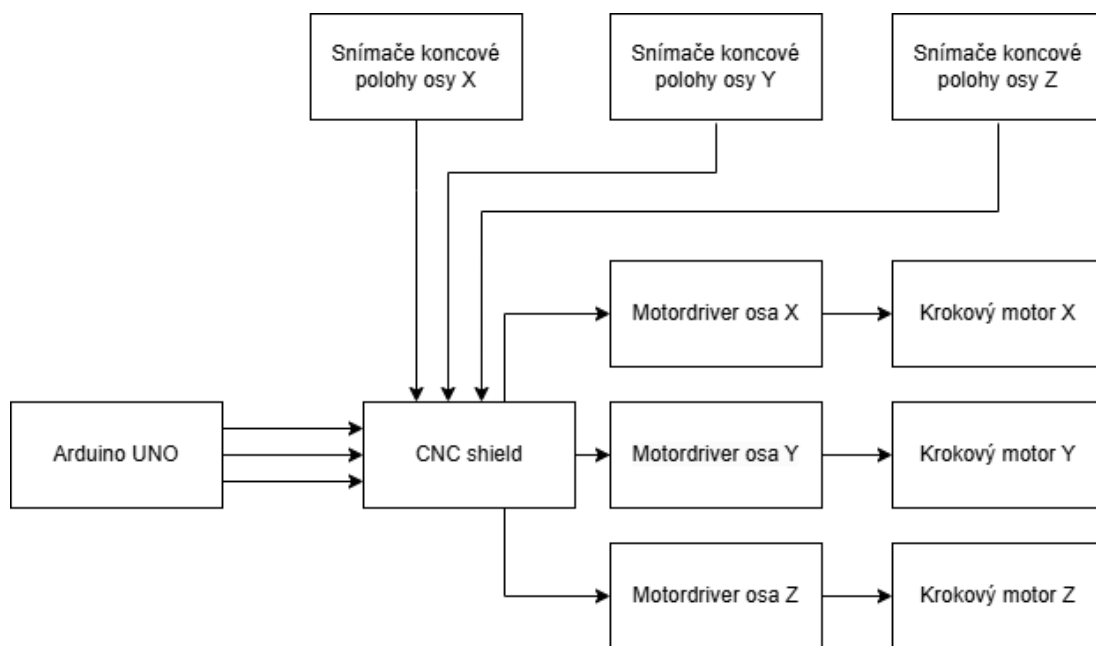
Řídicí jednotka u CNC stroje slouží jako mozek celého systému, zpracovává programové instrukce (ve formě G-kódu) a na jejich základě řídí pohyb strojních částí a nástrojů. Zajišťuje přesné polohování, otáčky, posuvy a také koordinaci všech os, čímž umožňuje výrobu složitých dílů s vysokou přesností. Kromě samotného obrábění kontroluje i chod bezpečnostních prvků, diagnostikuje chyby a komunikuje s obsluhou pomocí ovládacího panelu. Bez řídicí jednotky by CNC stroj nebyl schopen automaticky a opakovaně vykonávat naprogramované operace.

Řídicí jednotka získává data potřebná pro řízení stroje prostřednictvím komunikačního rozhraní. Nejčastěji se využívá sériová komunikace, obvykle přes USB nebo UART. V tomto režimu je CNC stroj přímo propojen s počítačem nebo jiným řídicím zařízením, které postupně odesílá jednotlivé příkazy do mikrokontroleru. Tento způsob umožňuje přímé ovládání stroje v reálném čase a zároveň poskytuje možnost průběžně upravovat program podle aktuální situace. Výhodou je také možnost online sledování provozu, rychlé diagnostiky chyb a okamžité odezvy systému na vstupy uživatele. Určitou nevýhodou tohoto přístupu může být závislost na stabilitě komunikace, výpadek spojení může znamenat přerušování obráběcího cyklu, případně ztrátu právě vykonávaných instrukcí.

Řídicí jednotka se však neomezuje pouze na příjem instrukcí. Jejím hlavním úkolem je interpretovat obdržená data a převést je na konkrétní elektrické signály, které přesně řídí činnost motorů, spínání vřetena, pohyb jednotlivých os a případně dalších periférií. [16] Pro tuto činnost se skládá z několika základních částí:

- Procesor nebo mikrokontrolér, který zajišťuje samotné řízení, zpracování dat a výpočet dráhové interpolace.
- Paměťová jednotka, ve které jsou uchovávány konfigurační parametry, pracovní nastavení nebo firmware.
- Komunikační rozhraní, které slouží k propojení se vstupním zařízením (typicky PC) a zajišťuje přenos instrukcí, dat nebo příkazů operátora.
- Ovladače motorů (drivery), které překládají nízkourovňové signály z řídicího systému na proudové impulzy vhodné pro krokové nebo servomotory.
- Bezpečnostní obvody, které sledují stav systému, vyhodnocují vstupy z havarijních tlačítek, koncových snímačů a dalších prvků, a v případě chyby přerušují činnost systému.

V následujícím blokovém schématu jsou tyto jednotlivé části přehledně znázorněny včetně jejich vzájemných propojení, což umožní lépe pochopit tok informací a signálů uvnitř celého CNC systému.



Obrázek 16 - Blokové schéma řídicí jednotky [Autor]

2.6 Nástroj

CNC zařízení představuje univerzální technologii, jejíž konkrétní využití je primárně určeno typem použitého nástroje. Zatímco samotný stroj nabízí téměř neomezené možnosti aplikace, právě nástroj definuje, jakého charakteru bude výsledná operace. V případě tvarovacích zařízení se může jednat například o extrudér, lakovací jednotku či jiné přídatné zařízení, které slouží k aplikaci nebo nanášení materiálu. Naproti tomu dělicí stroje využívají široké spektrum gravírovacích hlav, brusek či vrtacích jednotek, jež pracují na principu odebírání materiálu.

V oblasti výroby desek plošných spojů (DPS), zejména při konturování nebo depanelizaci, hraje klíčovou roli vhodný výběr vřetena. Pro profesionální frézování DPS se běžně využívají vřetena poháněná stlačeným vzduchem. Tento typ pohonu eliminuje riziko elektromagnetického rušení a zároveň poskytuje dostatečný kroutící moment i otáčkový rozsah pro precizní opracování. U méně náročných aplikací, typicky u stolních či hobby frézek, se využívají standardní stejnosměrné elektromotory, jejichž hřídel je zakončena kleštinovým upínáním pro osazení vhodného nástroje. Pokročilé systémy mohou být rovněž vybaveny funkcí automatické výměny nástroje, což umožňuje nejen operace s různou hloubkou a šířkou řezu, vyvrtání děr pro osazení THT komponent ale i následné začištění frézovaných drah. Tento proces zajišťuje odstranění jemných měděných třísek a přispívá tak k vyšší estetické i funkční kvalitě vyrobené desky.

Samotný výběr vřetena není z hlediska konstrukce zásadně komplikovaný. Jelikož se během frézování DPS odebrává pouze velmi tenká vrstva mědi – typicky v rozsahu desítek mikrometrů – není třeba počítat s vysokými objemy úběru materiálu. Důležité však je, aby vřeteno dosahovalo otáček minimálně v rozsahu 10 000 až 30 000 ot./min, přičemž vyšší otáčky mají přímý vliv na kvalitu řezu i rychlost zpracování.[17]

Přestože vřeteno je zásadní komponent celého systému, není jeho konkrétní typ rozhodující pro základní funkci zařízení. Mnohem důležitějším faktorem je volba samotného nástroje, tedy vrtáku, který zásadně ovlivňuje jak šířku řezu, tak i kvalitu výsledného opracování. Výběr vhodného nástroje se odvíjí od charakteristiky obráběného materiálu, zejména jeho tvrdosti a abrazivnosti. V případě frézování DPS, kde se opracovává laminátová základna s tenkou měděnou vrstvou, se běžně používají nástroje se dvěma základními geometriemi – spirálová a tzv. diamantový vzor. Spirálové nástroje jsou primárně určeny pro začišťovací operace a efektivní lámání třísek, zatímco nástroje s diamantovým vzorem se uplatňují při samotném frézování drah.

Vrtáky jsou dostupné v různých délkách a průměrech, které se volí podle konkrétní aplikace a kompatibility s daným vřetenem. Standardní nabídka zahrnuje průměry od 0,4 mm do 3,175 mm a délky obvykle v rozmezí 2 až 10 mm. Pro zajištění co nejdelší životnosti zařízení a maximální kvality výstupu je obecně doporučeno volit co nejkratší možnou délku nástroje. Ukázkové provedení těchto nástrojů je možné vidět na následujícím obrázku.[18]



Obrázek 17 - Vrtáky pro výrobu DPS o různých velikostech [19]

2.7 Výroba DPS frézováním

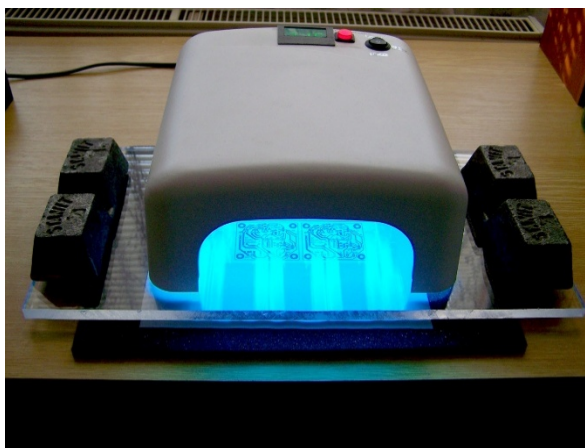
Výroba plošných spojů (DPS) metodou frézování představuje efektivní a ekologickou alternativu k tradičnímu chemickému leptání. Tento způsob, označovaný také jako „suchá cesta“, je obzvláště vhodný pro prototypovou a malosériovou výrobu, jelikož nevyžaduje práci s nebezpečnými chemikáliemi a zároveň umožňuje rychlou realizaci návrhu. Samotný proces začíná tvorbou schématu zapojení v návrhovém softwaru Eagle, kde se po návrhu elektrického obvodu přechází k rozložení součástek na desce a navrhování vodivých spojů. Při návrhu je důležité zohlednit umístění montážních otvorů a optimalizovat zemní plochy pro co nejefektivnější funkci obvodu.[20]

Z navržené desky se následně exportují výrobní podklady ve formátech Gerber pro měděné vrstvy a Excellon pro vrtací data, pokud frézka disponuje automatickou výměnou nástroje. Tyto soubory se dále zpracovávají v programu FlatCAM, kde se nastavují technologické parametry frézování, zejména průměr použité frézy, hloubka řezu, posuvová rychlost a otáčky vřetene. Výstupem z tohoto kroku je G-kód, který slouží jako vstup pro CNC gravírovací frézku.[20]

Po přípravě výrobních dat následuje fixace měděné desky (kuprextitu) na pracovní plochu stroje a osazení frézky vhodnými nástroji, gravírovacími frézami a vrtáky dle návrhu. Před samotným frézováním se doporučuje provést tzv. autoleveling, který pomocí měření povrchu kompenzuje jeho nerovnosti a zajistí konstantní hloubku řezu. Poté frézka pomocí generovaného G-kódu odfrézuje izolační drážky mezi vodivými cestami a vyvrtá potřebné otvory pro vývody součástek. Po dokončení obrábění se plošný spoj očistí od nečistot a je připraven pro následné osazení a pájení.[20]

2.8 Jiné metody výroby DPS

Existuje několik dalších způsobů výroby desek plošných spojů, jedním z nejstarších a nejjednodušších způsobů je leptání pomocí kyseliny. Při této metodě se používá fotosenzitivní vrstva nanesená na měděnou desku. Tato deska se následně osvětlí přes fotomasku a poté vyvolá v chemickém roztoku. Výhodou je vysoká přesnost a možnost výroby jemných detailů. Nevýhodou je složitější příprava, dražší materiály a nutnost speciálního vybavení. Na obrázku můžeme vidět příklad výroby DPS fotocestou v domácích podmínkách.[21]



Obrázek 18 - Fotografie procesu osvětlování přes fotomasku [22]

Moderní metodou je laserová ablace, která využívá laserový paprsek k přesnému odstranění mědi z povrchu DPS. Tento způsob umožňuje velmi jemnou práci s vysokou přesností. Výhodou je rychlost a čistota procesu, nevýhodou je však vysoká cena zařízení a jeho údržby. Na následujícím obrázku můžeme vidět frézu na výrobu DPS laserem.[23]



Obrázek 19 - Fréza pro výrobu DPS laserem [24]

3 Software CNC

Software používaný v CNC strojích představuje klíčovou část celého systému, která umožňuje efektivní řízení a ovládání všech mechanických komponentů. Obecně lze CNC software rozdělit do dvou hlavních skupin. První skupinou je software řídicí jednotky, který má za úkol přímo ovládat pohyb jednotlivých os a vřetena. Druhou skupinou je software pro generování G-kódu, který slouží k přípravě a naprogramování obrábění, gravírování nebo jiných činností.

Software řídicí jednotky se stará o přímé ovládání motorů, čtení vstupních signálů od uživatele a správné provedení zadaných instrukcí. Tato část softwaru komunikuje s hardwarem prostřednictvím ovladačů (driverů) motorů a dalších elektronických komponentů. Úkolem řídicího softwaru je zajistit přesné pohyby v souladu s požadovaným programem, kontrolovat rychlosti, zrychlení, polohování a další parametry.

Software pro generování G-kódu naopak slouží k vytvoření samotného programu, který popisuje, jakým způsobem má CNC stroj pracovat. Nejčastěji se jedná o CAD/CAM software, který uživateli umožňuje nakreslit nebo vymodelovat požadovaný výrobek, nastavit pracovní parametry a následně vygenerovat příslušný G-kód. Tento kód je pak nahrán do řídicího softwaru, který jej interpretuje a vykonává. Kromě toho existují i specializované nástroje pro úpravy G-kódu, které umožňují ručně editovat nebo optimalizovat generovaný program.

3.1 SW řídicí jednotky

Software řídicí jednotky je klíčový prvek CNC systému, který se stará o převod G-kódu na konkrétní pohyby jednotlivých komponentů stroje. Jeho hlavním úkolem je zajistit přesné ovládání motorů, vřetena a dalších prvků CNC stroje podle zadaných instrukcí. Tento

software přijímá vstupní signály od uživatele nebo z paměťového zařízení, dekóduje je a převádí na pokyny pro motory a další ovládací prvky.

Hlavní funkcí softwaru řídicí jednotky je čtení a interpretace G-kódu, který definuje sekvenci pohybů, rychlostí a dalších parametrů. Na základě těchto informací software vypočítá, jaké impulsy mají být odeslány na drivery motorů, aby bylo dosaženo přesného pohybu podle zadaných souřadnic. Řídicí software také monitoruje stav CNC stroje, zajišťuje bezpečnostní prvky a případně upravuje chod v závislosti na aktuálních podmínkách.

Příklady běžně používaného řídicího softwaru zahrnují programy jako Mach3, Mach4, LinuxCNC nebo GRBL. Tyto systémy podporují širokou škálu CNC strojů a umožňují snadné přizpůsobení konkrétním potřebám uživatele. Správné nastavení softwaru řídicí jednotky je zásadní pro dosažení vysoké přesnosti, plynulosti a spolehlivosti celého procesu obrábění.

3.2 G Kód


G-kód je standardizovaný programovací jazyk používaný pro ovládání CNC strojů. Jedná se o sekvenci příkazů, které definují konkrétní pohyby, rychlosti, polohy a další parametry potřebné k provedení obrábění nebo jiné operace. G-kód byl poprvé zaveden v 50. letech 20. století a od té doby se stal průmyslovým standardem pro řízení numericky řízených strojů. [25]

G-kód se generuje pomocí CAD/CAM softwaru, který na základě 2D nebo 3D modelu vytvoří seznam příkazů, jež definují pohyby nástroje po zadané dráze. Každý příkaz se skládá z jednoho nebo více písmen, které označují typ operace (například G pro pohyb, M pro pomocné funkce) a číselných parametrů, které určují konkrétní hodnoty (např. souřadnice, rychlost posuvu, otáčky vřetena). [25]

Výhodou G-kódu je jeho univerzálnost a široká podpora napříč různými CNC systémy. Pomocí G-kódu lze velmi přesně definovat každý pohyb a upravovat jej podle potřeby. Nevýhodou je naopak složitost zápisu, zvláště při ručním programování. Proto se běžně používají CAD/CAM programy, které automaticky generují G-kód na základě navrženého modelu. Na následujícím obrázku můžeme vidět příklad toho, jak G kód vypadá. [25]

```
G-code Sample

M190 S60 ; wait for bed temp
M109 S215 ; wait for extruder temp
G29 ; mesh bed leveling
G1 X10 Y-3.0 Z0.5 F6000.0
G92 E0.0
G1 X60.0 E9.0 F1000.0 ; intro line
G1 X100.0 E12.5 F1000.0 ; intro line
G92 E0.0
```



Obrázek 20 - Příklad G kódu [25]

4 GRBL

GRBL je bezplatný open-source firmware navržený pro řízení pohybu CNC strojů, jako jsou frézky, laserové rezačky a další zařízení. Je optimalizován pro běh na platformě Arduino, konkrétně na mikrokontrolérech AVR (např. Arduino Uno - ATmega328P), což umožňuje uživatelům využít cenově dostupný hardware pro ovládání svých CNC zařízení. GRBL interpretuje G-kód a převádí jej na přesné pohyby motorů, čímž zajišťuje efektivní a přesné obrábění. Díky své jednoduchosti, vysokému výkonu a nízkým hardwarovým nárokům se GRBL stal standardem v komunitě tvůrců a je využíván v mnoha projektech, včetně 3D tiskáren a různých typů kreslicích strojů. [26]

Projekt GRBL byl zahájen v roce 2009 Simenem Svalem Skogsrudem a od roku 2011 je veden jako komunitní open-source projekt pod vedením Sungeuna "Sonnyho" Jeona. Od roku 2019 však projekt nepřijímá nové příspěvky ani aktualizace. V důsledku toho vznikly různé modifikace a alternativy, jako například μ CNC, grblHAL, FluidNC nebo Rabbit GRBL, které rozšiřují funkčnost původního firmwaru a přizpůsobují jej novým potřebám uživatelů. Díky své otevřené povaze umožňuje GRBL uživatelům přizpůsobit firmware specifickým požadavkům jejich CNC strojů, což podporuje inovace a sdílení znalostí v komunitě. [26]

GRBL umožňuje provoz tříosých CNC strojů (X, Y, Z) a podporuje různé režimy krokování a rychlostí. Kvůli své nízké náročnosti na hardware je ideální pro hobby projekty a menší CNC stroje.

5 Software pro komunikaci s CNC

Řízení CNC stroje může být realizováno více způsoby. Abychom mohli vyhodnotit vhodnost jednotlivých metod, je nejprve nutné si ujasnit, co od systému řízení očekáváme. Cílem není řídit jednotlivé motory a vřeteno přímo, tuto úlohu přebírá řídicí jednotka. Nás bude zajímat způsob, jakým jí předáváme potřebná data, konkrétně G-kód, podle kterého má vykonávat svou práci.

V této kapitole se zaměříme pouze na způsob, který je pro náš projekt relevantní, tedy sériovou komunikaci mezi počítačem a řídicí jednotkou, která zajišťuje přenos instrukcí v reálném čase.

5.1 Sériová komunikace

Sériová komunikace je běžně využívaným způsobem přenosu dat mezi dvěma zařízeními. V našem případě jde o komunikaci mezi PC, na kterém je uložen G-kód, a mikrokontrolerem, jenž slouží jako řídicí jednotka CNC stroje. Jde o efektivní a relativně jednoduchou metodu komunikace, která nevyžaduje žádné dodatečné hardwarové prostředky kromě USB připojení. [27]

Princip spočívá v tom, že data jsou přenášena po jednotlivých bitech, sekvenčně, přes jediný datový vodič (TX) a společný uzemňovací vodič (GND). Mikrokontroler (např. Arduino) má pro tyto účely vyhrazené piny RX (příjem dat) a TX (odesílání dat), přičemž fyzické

připojení k PC je zprostředkováno přes USB převodník. Tím je zajištěna možnost přímého přenosu instrukcí z počítače bez nutnosti mezikroku. [27]

Komunikace se inicializuje v programu funkcí `Serial.begin(baudRate)`, kde `baudRate` označuje rychlost přenosu v bitech za sekundu (např. 9600 nebo 115200 bps). Data se na straně mikrokontroleru odesílají funkcemi jako `Serial.print()` nebo `Serial.println()`, a přijímají se pomocí `Serial.read()`. Aby bylo možné čtení efektivně řídit, využívá se funkce `Serial.available()`, která vrací počet bajtů připravených k přečtení.[27]

Výhodou tohoto způsobu je, že řídicí jednotka je během provozu přímo napojena na počítač a přijímá jednotlivé instrukce podle aktuálního stavu programu. Umožňuje to ladění a zásahy do běhu programu v reálném čase, například při testování nových drah nástroje nebo ověřování správnosti interpolace. Tento způsob řízení tedy zajišťuje vysokou flexibilitu a kontrolu. [27]

```
//ukázka funkce Serial.print();
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  Serial.print("abc ");
  delay(500);
}
```

Obrázek 21: Foto kódu [27]

5.2 Struktura a řízení komunikace

Komunikace mezi uživatelem a řídicí jednotkou CNC stroje probíhá prostřednictvím sekvence instrukcí ve formě G-kódu, který je do mikrokontroleru odeslán skrze sériové rozhraní. Tyto instrukce mohou být zadávány buď ručně, například pomocí sériového monitoru v Arduino IDE, nebo prostřednictvím specializovaného softwaru typu G-code sender, jako je Universal G-code Sender, CNCjs nebo bCNC. Tyto aplikace poskytují uživatelské rozhraní pro odesílání příkazů, sledování stavu stroje a ladění procesu obrábění.

Komunikační proces začíná většinou inicializačními příkazy, mezi které patří například homing, příkaz pro navedení stroje do výchozí (referenční) pozice. Tento příkaz bývá typicky označován jako \$H a jeho účelem je přesné určení fyzického počátku pracovního prostoru pomocí koncových spínačů. Jakmile stroj ví, kde se nachází, může uživatel určit pracovní počátek pomocí příkazu G92, který nastaví aktuální pozici jako novou nulovou souřadnici. Například `G92 X0 Y0 Z0` definuje současné souřadnice jako výchozí bod programu.

Po úvodním nastavení následuje samotné odesílání pracovních instrukcí, které stroj vykonává. Tyto instrukce mohou zahrnovat rychlé přesuny (např. `G0 X50 Y50`), lineární interpolace při obrábění (např. `G1 Z-5 F300`) nebo zapnutí vřetena (`M3 S1000`). Jednotlivé řádky G-kódu jsou posílány postupně, přičemž řídicí jednotka po zpracování každého příkazu obvykle vrací odpověď ve formátu ok nebo chybové hlášení. Tato zpětná vazba je

důležitá pro zajištění správné synchronizace mezi odesílanými instrukcemi a prováděnými pohyby.[28]

Komunikace probíhá v tzv. half-duplex režimu – v daný okamžik buď vysílá počítač, nebo odpovídá řídicí jednotka. G-code sendery proto často používají tzv. řízení toku, kdy čekají na potvrzení z jednotky (ok), než odešlou další příkaz. Některé pokročilejší implementace navíc využívají vnitřní fronty příkazů (streamování), avšak i zde musí být respektována kapacita bufferu jednotky.[29]

Součástí komunikačního protokolu jsou rovněž speciální řídicí znaky, které umožňují rychlé zásahy do běžícího procesu. Například znak ! slouží k dočasnému zastavení pohybu (pauza), ~ k jeho opětovnému spuštění a CTRL+X k úplnému resetování řídicího systému. K dispozici je také tzv. nouzové zastavení, které okamžitě přeruší běh programu bez ohledu na aktuální stav vykonávání.[30]

6 Cílené parametry

Před samotným návrhem a konstrukcí CNC frézky bylo nezbytné stanovit cílové technické parametry, kterých by mělo zařízení dosahovat. Tyto parametry vycházejí z požadavků na výrobu plošných spojů v prostředí domácí nebo prototypové dílny, kde není kladen důraz na vysoký výkon, ale spíše na dostupnost, přesnost a jednoduchost. Zvolená řešení proto reflektují rovnováhu mezi technickými možnostmi použitých komponent, ekonomickou dostupností a funkčními nároky procesu frézování DPS.

Jako velikost pracovní plochy byl zvolen rozměr 100 × 80 mm, což odpovídá maximální velikosti návrhu, který je možné vytvořit v bezplatné verzi návrhového softwaru Eagle. Tento rozměr byl zároveň považován za optimální z hlediska kompaktnosti konstrukce a potřeb běžné domácí výroby.

Rychlost otáček vřetena byla cíleně stanovena v rozsahu 10 000 až 12 000 otáček za minutu. Taková hodnota je považována za minimální pro efektivní frézování měděné vrstvy na laminátových deskách a zároveň je technicky dosažitelná i pomocí cenově dostupných přístrojů. Vysoké otáčky mají zásadní vliv na kvalitu řezu a životnost frézovacího nástroje.

Pro rychlost posuvu os X a Y byla zvolena hodnota 300 mm/min. Tato rychlost představuje kompromis mezi rychlostí výroby a přesností řezu, vyšší rychlosti by mohly vést k mechanickým chybám, zatímco nižší by neúměrně prodlužovaly celkový čas obrábění.

Přesnost pohybu byla stanovena na ±0,05 mm. Taková odchylka je dostatečná pro vedení signálových cest mezi vývody součástek a zároveň odpovídá reálným možnostem konstrukce vycházející z krokových motorů a trapézových šroubů.

Rozlišení pohonu, tedy nejmenší možný přírůstek pohybu, bylo určeno na 0,00625 mm na krok v teoretické rovině, při mikrokrokování v režimu 1/16. V praxi se ovšem kvůli mechanickým vůlím a pružnosti systému pohybuje efektivní hodnota mezi 0,01 a 0,02 mm. Tato hodnota je však stále více než dostatečná pro aplikace, kde se frézují cesty o šířkách stovek mikrometrů.

Hloubka řezu v ose Z bude dosahovat maximálně 1,6 mm, což odpovídá standardní tloušťce desek. Samotné frézování mědi však vyžaduje výrazně menší úběr, obvykle se odebírá pouze povrchová vrstva mědi o tloušťce do 50 μm . Z tohoto důvodu je hlavní důraz kladen na přesné řízení hloubky, nikoli na její maximální hodnotu.

Přehled těchto parametrů je shrnut v následující tabulce.

Tabulka 1 - Tabulka s cílenými parametry

Parametr	Hodnota	Poznámka
Velikost pracovní plochy	100 × 80 mm (80 cm ²)	Maximální rozměr pro návrh v Eagle free verzi
Rychlost otáček vřetena	10 000–12 000 RPM	Udává, jak rychle se otáčí nástroj – ovlivňuje kvalitu řezu a trvanlivost nástroje
Rychlost posuvu (X/Y)	300 mm/min	Rychlost pohybu nástroje během frézování – vyšší rychlosti snižují čas, ale zvyšují riziko chyb
Přesnost pohybu	±0,05 mm	Maximální odchylka polohy oproti požadované hodnotě – důležitá pro kvalitu detailních cest
Rozlišení pohonů	0,00625 mm/krok (teoretické) 0,01–0,02 mm (efektivní)	Nejmenší možný přírůstek pohybu osy; efektivní hodnota zohledňuje vůle a pružnosti systému
Hloubka řezu (Z)	1,6 mm (maximální), 50 μm (pracovní)	Maximální hloubka průchodu v ose Z – odpovídá tloušťce běžné desky

7 Skutečná konstrukce CNC

Důležitým faktorem při návrhu konstrukce bylo si stanovit, jaké rozměry zařízení bude mít. Jelikož zařízení pracuje s plochou do 80 cm², zařízení nebude nijak obrovské. Tato plocha byla rozdělena na obdélník o rozměrech 8×10 cm. Z toho již vyplývá, že jedna z os bude muset mít pracovní plochu minimálně 10 cm a druhá minimálně 8 cm. Z těchto rozměrů bylo tedy vypočítáno, že i s rezervou bude mít zařízení na délku maximálně 15 cm a na šířku 13 cm. Volbou materiálů se nám tento rozměr ještě změní, což je zmíněno v následující kapitole.

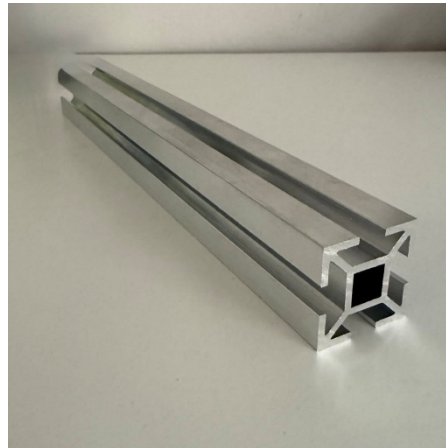
Pro konstrukci bylo nutné použít velmi pevné materiály, které unesou váhu nástroje, a to i při zatížení během frézování. Zároveň bylo důležité zajistit dostatečnou tuhost celé konstrukce, aby při obrábění nedocházelo k deformacím, vibracím a ztrátě přesnosti. Návrh konstrukce proto vycházel z kompromisu mezi pevností, hmotností a rozměry zařízení. Výběr konkrétních materiálů, způsob spojování a návrh jednotlivých částí jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.

7.1 Hrubá konstrukce

Stabilita a pevnost jsou dvě vlastnosti, které jsou pro takový přístroj naprosto stěžejní. Volba materiálu pro hrubou konstrukci je tedy velmi zásadní krok, který není radno podcenit. Kovy

jsou dostatečně pevné, aby zvládly nápor sil, které fréza bude potřebovat. Zároveň jsou dostatečně těžké, takže zařízení bude lépe držet na pracovní ploše a nebude hrozit převrácení nebo jiný fatální problém.

Při návrhu konstrukce bylo potřeba také myslet dopředu. Na konstrukci byly umístěny osy a motory, které musely být pevně spojeny s konstrukcí. Po prozkoumání trhu byly zvoleny modulární hliníkové profily o rozměru 30x30mm, které konstrukci zaručily požadovanou váhu, pevnost a možnost návrhu držáků pro všechny další komponenty co byly potřeba.



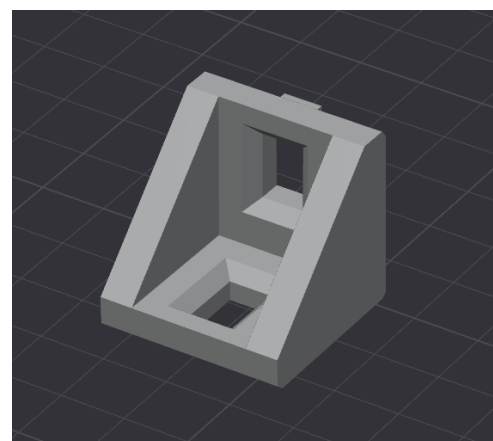
Obrázek 22 - Fotografie použitého profilu[Autor]

Profily byly spojeny kovovými rohovými spojkami tak, aby tvořily obdélník. Spojky jsou vylité z pevné slitiny, takže nám spojí konstrukci z jednotlivých profilů do pevného tvaru, na kterém můžeme stavět. Přichyceny byly spojovacím materiálem, který k nim byl dodán, přesně dělaný tak, aby do zapadl do drážek profilů.

Při testování byly také dočasně použity plastové spojky, čistě kvůli jejich dostupnosti, a to vytisknutím na 3D tiskárně. Pro reálné použití ale mohou být riskantní z důvodu pevnosti.

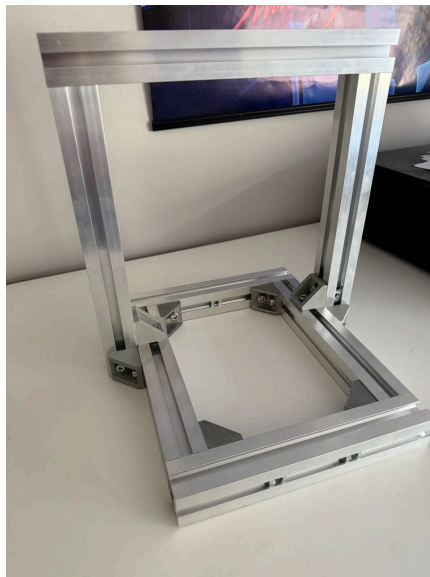


Obrázek 24 - Kovová spojka použita při konstrukci[Autor]



Obrázek 23 - 3D model plastové spojky[Autor]

Spojením do obdélníku byla tedy vytvořena základna, na které bude celé zařízení stát. Delší strana tohoto obdélníku byla zvolena jako osa Y. Kolmo k této ose musí být osa X, která bude upevněna nad osu Y. Na delší strany obdélníku byly přidělaný z obou stran profily tak, aby tvořily podporu pro upevnění této osy. Holou hrubou konstrukci můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 25 - Fotografie hrubé konstrukce[Autor]

Celá hrubá konstrukce tak nabyla na rozměru, celkový finální rozměr je 28x26x26 cm (VxŠxH).

7.2 Elektronika řídicí jednotky

Projekt GRBL je koncipován na mikroprocesorech Arduino, konkrétně Atmega 328. Jako hlavní mozek byl tedy zvolen mikroprocesor Arduino UNO. Arduino bylo následně osazeno modulem navrženým přesně pro tyto aplikace. Je navržený tak, aby na Arduino sedl bez jakýchkoli úprav, instalace tedy byla velmi jednoduchá. Jednoduše se shield nasunu na desku Arduina. Tento shield má na horní straně čtyři patice, které slouží pro osazení motor driverů.

Pro napájení krokových motorů byl použit spínaný zdroj o konstantním napětí 12V a maximálním proudovém zatížení 2,5A. Tento zdroj se projevil jako dostatečný, protože i při zátěži všech tří motorů zařízení neodebíralo více než 0,7A.

Pro řízení krokových motorů byly zvoleny drivery typu A4988. Tyto drivery sloužily k přesnému řízení dvoufázových krokových motorů pomocí mikrokrokování a umožňovaly ovládat motory jednoduchými pulzními signály. Díky tomu bylo možné dosáhnout plynulého chodu motorů a vysoké přesnosti polohování, což bylo pro výrobu plošných spojů klíčové.

Driver A4988 umožňoval provoz v několika režimech mikrokrokování: plný krok, půlkrok, čtvrtinový krok, osminový krok a šestnáctinový krok. Tato vlastnost byla zásadní pro dosažení jemného pohybu a snížení vibrací během frézování. Pro pohyb byl použit 1/16

krok. Nastavení mikrokrokování bylo prováděno jednoduše pomocí propojení odpovídajících řídicích pinů propojkami.[31]

A4988 byl schopen řídit motory s maximálním proudem až 2 A na cívku při dostatečném chlazení, což plně vyhovovalo požadavkům použitých motorů 17HE19-2004S. V běžném provozu se proud nastavoval prostřednictvím trimru na modulu, čímž se optimalizoval výkon motoru a zároveň se minimalizovalo zahřívání.[31]

Další výhodou použití A4988 byla jeho vysoká dostupnost, nízká cena a snadná integrace s běžnými CNC řídicími systémy s deskami využívajícími firmware typu GRBL. Drivery byly také vybaveny ochranami proti přehřátí, nadproudu a podpětí, což zvýšilo celkovou spolehlivost zařízení. Výrobce k modulu rovněž dodává malý chladič, který zajišťuje lepší teplotní stabilitu modulu.[31]

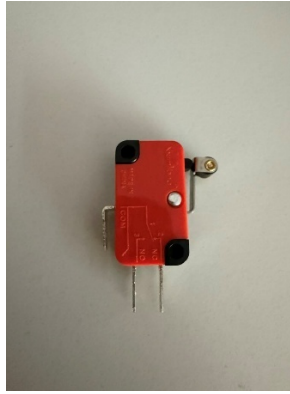
Před uvedením zařízení do provozu bylo nutné správně nastavit proudový limit jednotlivých driverů A4988. Tento limit určoval maximální proud protékající cívkami krokových motorů, a tím chránil motory i drivery před přehřátím nebo poškozením. Nastavení bylo prováděno otočením malého trimru umístěného přímo na modulu driveru.[31]

Pro nastavení bylo využito metody měření referenčního napětí (V_{ref}) mezi zemí a trimrem. Výpočet správného V_{ref} vycházel ze vztahu:

$$I_{Motor} = U_{Ref} * 2$$

kde I_{Motor} představoval maximální proud motoru na jednu fázi. V případě motorů 17HE19-2004S, jejichž jmenovitý proud činil 2,0 A, bylo U_{Ref} nastaveno na hodnotu přibližně 1,0 V. Vzhledem k omezením samotného driveru A4988, který dlouhodobě zvládal bez chladiče proudy nižší než 1,5 A, byl však proud snížen na bezpečnou hodnotu kolem 1,2 A na cívku, což odpovídalo U_{Ref} přibližně 0,6 V.[31]

Na síldu Arduina se také nacházely piny označené jako END STOPS. Tyto piny sloužily pro připojení koncových spínačů, které byly důležité pro autonomní chod zařízení. Nejběžnějším způsobem využití kontaktních snímačů je implementace tzv. hardwarových limitů (Hard limits). V tomto režimu jsou snímače připojeny přímo na vstupy mikrokontroleru a při jejich sepnutí je okamžitě aktivována ochranná reakce, obvykle okamžitě zastavení všech os a aktivace nouzového režimu. V systému GRBL se hardwarové limity aktivují pomocí parametru \$21, kde hodnota 1 znamená zapnuto a 0 vypnuto. Funkce hard limitů je nezávislá na předchozím pohybu nebo výpočtech, jde o přímou odezvu na sepnutí snímače, a proto bývá velmi spolehlivá.[32]



Obrázek 26 - Fotografie kontaktního snímače[Autor]

Druhou možností jsou tzv. softwarové limity (Soft limits), které jsou založeny na přesném určení výchozí pozice (obvykle po Homingu) a definici maximálního pracovního rozsahu každé osy. Pokud se při pohybu detekuje, že by některá osa měla překročit tento rozsah, pohyb je zablokován dříve, než k němu vůbec dojde. Softwarové limity jsou v GRBL aktivovány pomocí parametru \$20, opět s hodnotou 1 pro zapnutí a 0 pro vypnutí. Aby mohly softwarové limity správně fungovat, je nutné, aby stroj po zapnutí vždy provedl homing a tím definoval počáteční absolutní pozici.[32]

Veškerá elektronika byla uložena a zapouzdražena v krabici, aby nemohlo dojít k neúmyslné manipulaci s živými částmi zařízení, nebo neúmyslnému odpojení komponent.

7.3 Osy a jejich pohyb

Osa zařízení se skládala z 5 hlavních částí. Jejím úkolem bylo plynule a stabilně posouvat požadovaný díl po dané vzdálenosti s , ideálně, nulovou vůlí. Existuje mnoho způsobů realizace tohoto pohybového ústrojí jako takového, nicméně nejmenší vůle nám poskytují závitové tyče, proto byly zvoleny. Aparát osy se hýbal po ose díky rotačnímu pohybu, který zajišťoval krokový motor. Naproti krokovému motoru bylo umístěno ložisko, aby bylo zamezeno tření a tím zbytečné namáhání motoru. Závitové tyče byly doplněny o vodící tyče, které zajišťovaly oporu pohybovému aparátu. Poslední, ale nejdůležitější, byly samotné držáky pro kompletaci os a jejich uchycení ke konstrukci. Všechny tyto bloky budou podrobně popsány v následujících kapitolách.

7.3.1 Krokové motory

Pro pohon os CNC frézky byly zvoleny krokové motory typu 17HE19-2004S. Tyto motory patří do kategorie NEMA 17 a vyznačují se kompaktními rozměry s šířkou těla 42 mm. Motor poskytuje držný moment $55 \text{ N}\cdot\text{cm}$ (0,55 Nm), což bylo plně dostačující pro přesné polohování a plynulý pohyb všech os při frézování plošných spojů.[14]

Motor 17HE19-2004S měl dvoufázovou konstrukci a jeho jmenovitý proud činil 2,0 A na fázi. Jmenovitý odpor vinutí byl přibližně $1,4 \Omega$ a motor je určen pro práci s napětím 12–36 V, což umožňovalo použití běžně dostupných napájecích zdrojů a driverů. Krokový úhel činil $1,8^\circ$, tedy 200 kroků na jednu otáčku, což přispívalo k dostatečné rozlišovací schopnosti CNC stroje.

Výběr těchto motorů byl odůvodněn kombinací několika faktorů. Předně nabídly vyvážený poměr mezi výkonem a velikostí, což bylo klíčové pro zachování kompaktní konstrukce frézky. Díky nízké hmotnosti motoru nedocházelo k nadměrnému zatěžování konstrukce stroje, což zvyšovalo dynamiku a přesnost pohybu. Dostatečný přídržný moment umožňoval spolehlivé vedení os i při jemném obrábění, kdy bylo zapotřebí zachovat vysokou přesnost a minimalizovat chyby způsobené vibracemi nebo mechanickými vůlemi. Dalším důvodem použití motorů 17HE19-2004S byla jejich dostupnost a osvědčená spolehlivost v hobby i poloprofesionálních CNC aplikacích. Kombinace těchto vlastností vedla k rozhodnutí nasadit právě tento model pro všechny hlavní osy frézky.

Při testování motorů byl odhalen nedostatek, který byl pravděpodobně zaviněn dodavatelem, a to takový, že motory byly jinak „napinované“, než požadoval CNC shield. Při pokynu pro otáčení tedy motor pouze vibroval. Po odhalení problému byl motor přepínován podle požadavků dokumentace CNC shieldu.

7.3.2 Závítové tyče se šroubovou maticí a vodící tyče

Vodící tyče, jak již bylo zmíněno, sloužily pouze jako opora. Volba tedy výrazně neovlivnila funkci. Proto byly zvoleny obyčejné kovové tyče, seříznuty na požadovaný rozměr osy, o průměru 8 mm.

Hlavní parametry závítové tyče jsou průřez, který byl zachován s vodící tyčí, a to 8 mm, stoupání a sklon. Pro osu X a Y byly zvoleny závítové tyče se stoupáním 2 mm, což určuje vzdálenost mezi dvěma sousedními závity, a sklon 4 mm, což určuje vzdálenost posuvu při jednom otočení. Tyto parametry zajistily rychlý posuv a přesnost, díky jemnějšímu závitu. Délka tyče se standardně prodává v daných rozměrech, byl tedy zvolen nejbližší vhodný, a to 250 mm, a následně byly seříznuty dle potřeby. Pro osu Z byla zvolena závítová tyč se stoupáním 2 mm a sklonem také 2 mm. Byl zvolen menší sklon, protože osa Z je výrazně kratší.[33]

Závítová tyč se prodává v páru s maticí. Matice je z mosazi, s pravidelnými otvory po obvodu, které nabízí jednodušší možnost uchycení matice na navržené modely. Na následujícím obrázku můžeme vidět zvolenou závítovou tyč společně s maticí.



Obrázek 27 - Fotografie závítové tyče[Autor]

7.3.3 Nástroj

Pro účely frézování sklolaminátové desky opatřené měděnou vrstvou bylo nezbytné použít vřeteno schopné dosahovat alespoň 10 000 otáček za minutu (RPM). Tato hodnota představovala minimální technický požadavek, který by byl bez obtíží splnitelný pomocí většiny běžně dostupných komerčních modulů. Z hlediska dostupnosti na trhu nepředstavovalo dosažení této rychlosti zásadní problém, a to ani při použití zařízení nižší cenové kategorie. Z ekonomických důvodů byla z výběru automaticky vyloučena profesionální vřetena vyšší třídy, zejména modely s pneumatickým pohonem nebo funkcí automatické výměny nástroje. Tyto varianty sice nabízely vyšší výkon, přesnost i komfort obsluhy, avšak jejich cena byla vzhledem k charakteru projektu neakceptovatelná.

Jako vhodná náhrada byla zvolena mini bruska GEKO G81220 s příkonem 270 W. Tento model byl vybrán především kvůli poměru cena/výkon a dostatečnému rozsahu provozních parametrů. Přestože standardní balení obsahovalo množství doplňkového příslušenství, které nebylo pro konkrétní aplikaci využitelné, jejich přítomnost zvyšuje celkovou užitnou hodnotu zařízení a podtrhuje jeho multifunkční využití.

Bruska umožňuje plynulou regulaci otáček v širokém rozsahu od 8 000 RPM až po 32 500 RPM, což plně vyhovuje požadavkům pro frézování měděné vrstvy na DPS. Tento rozsah poskytuje dostatečnou flexibilitu při práci s různými nástroji a typy materiálů, a umožňuje tak přizpůsobení parametrů konkrétní úloze bez nutnosti výměny zařízení.[34]

Pro frézování sklolaminátových desek plošných spojů byly zvoleny vrtáky bez omezovacích (výškových) kroužků. Toto rozhodnutí bylo učiněno záměrně, aby byla zachována možnost flexibilního nastavení osy Z v závislosti na tloušťce obrobku a konkrétní výškové pozici upnuté brusky. Absence těchto kroužků umožňuje přesnější individuální přizpůsobení hloubky řezu a eliminuje mechanické omezení při nastavování pracovního prostoru. Jako nejvhodnější komerčně dostupná varianta byla vybrána sada obsahující 10 vrtáků, navržených přímo pro obrábění desek plošných spojů. Tato sada splňovala požadavek na odpovídající rozsah průměrů i kvalitu zpracování nástrojů potřebnou pro precizní práci v měděném materiálu.

V balení se nacházely vrtáky s tzv. diamantovou geometrií břitu, která je obzvláště vhodná pro jemné frézování měděných drah. Průměry jednotlivých nástrojů se pohybovaly v rozsahu od 0,8 mm do 3 mm, což pokrývá většinu běžně používaných šířek stop a izolačních drážek při výrobě DPS. Vrtáky byly vyrobeny z karbidu wolframu (označovaného často jako wolframová ocel), materiálu známého svou vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Pro zvýšení životnosti a zlepšení rezných vlastností byla pracovní část nástroje opatřena titanovou povrchovou úpravou.[35]

Průměr stopky všech vrtáků činil 3,175 mm, což je standardní hodnota plně kompatibilní s kleštinovým upínáním použité brusky. Tato kompatibilita zajišťuje spolehlivé a přesné upnutí nástroje bez nutnosti dalších úprav či adaptérů.[35]

7.3.4 Ložisko

Kuličkové ložisko bylo umístěno naproti krokovému motoru tak, aby jeden konec závitové tyče byl upevněn v ložisku, a druhý pevně spojen s osou motoru. Vnitřní průměr ložiska je 8 mm, ložisko je součástí většího kompletního „modulu“ navrženého právě pro uchycení na modulární hliníkové profily. Zároveň je vybaveno malými šrouby s imbusovou hlavičkou, které slouží pro pevné uchycení tyče do ložiska.

7.3.5 Spojovací materiál

Pro zachování integrity zařízení byly všechny spojovací materiály, šrouby, zvoleny s imbusovou hlavičkou. Jak malé šroubky na ložisku, tak malé šroubky na spojce u krokového motoru, mají právě imbusovou hlavičku. Pro spojení osy krokového motoru a závitové tyče byla zvolena pružná spojka, která je schopna při drobných nerovnostech přizpůsobit svou orientaci a zachovat plynulý rotační pohyb. Jedná se o komerčně dostupnou variantu, která poskytuje na jedné straně požadovaný průměr závitové tyče, tedy 8 mm, a na druhé průměr osy rotoru, tedy 4,5mm.



Obrázek 28 - Fotografie spojky motoru a závitové tyče[Autor]

Pro uchycení motorů byly zvoleny šrouby, které odpovídají dokumentaci krokového motoru, tedy o průměru 4 mm. Uchycení veškerých držáků musí být pevné a spolehlivé. Držáky jsou tedy spojeny více body šrouby s mnohem větším průměrem, aby bylo zajištěno opravdu pevného spoje, o průměru 8 mm s příslušnými matkami, které zapadají do hliníkových profilů.

7.3.6 3D modely držáků na osách

Jako první konstrukční celek byla navržena osa Y, která zajišťuje horizontální posun frézovaného obrobku – tedy samotné pracovní desky. Návrh vycházel z požadavku na jednoduchost, funkčnost a snadnou montáž komponent k hliníkovému rámu stroje.

Držák ložiska, který tvoří jednu stranu vedení osy Y, byl v první verzi navržen jako kompaktní hranolovitý prvek. Spodní část tohoto dílu byla tvarována tak, aby přesně dosedla na standardní hliníkový profil používaný pro konstrukci rámu CNC zařízení. K upevnění byly navrženy tři montážní otvory umožňující stabilní uchycení pomocí šroubů. Horní část držáku obsahovala otvor určený pro vsazení kuličkového ložiska, které tvoří kluzné uložení pro závitovou tyč. Boční stěna pak byla opatřena třemi otvory: jeden byl umístěn přesně ve středu výšky dílu a sloužil pro průchod závitové tyče, která byla vedena přímo ložiskem; zbývající dva otvory byly rozmístěny symetricky 10 mm od krajů držáku a sloužily pro uložení vodicích tyčí, zajišťujících směrovou stabilitu pohybu. Celková konfigurace tak umožňovala přesné a tuhé vedení celé osy.

Druhá strana sestavy, držák pro krokový motor, byla z hlediska konstrukce zrcadlovým protějškem. Spodní část byla konstrukčně shodná, neboť i zde bylo třeba zajistit kompatibilitu s hliníkovým profilem. Přední stěna zachovávala identické rozmístění otvorů pro vodicí a závitovou tyč, aby bylo zajištěno přesné a souosé vedení v celé délce osy Y.

Hlavní rozdíl spočíval v náhradě ložiska za krokový motor. Namísto otvoru pro uložení ložiska obsahoval tento díl přesně vymodelovaný prostor pro nasunutí motoru, který byl následně zajištěn příslušnými šrouby z protilehlé strany. Tím bylo dosaženo pevného a přesného osazení motoru bez vůle, což je klíčové pro přenos rotačního pohybu na závitovou tyč.

Finální verze držáků osy Y zůstala po stránce konstrukční v podstatě totožná s původní prototypovou verzí, neboť v průběhu testování se neobjevily žádné funkční nedostatky. Pro zvýšení estetické kvality celého zařízení byla upravena vizuální stránka dílů, aby všechny části působily jednotně. Kromě toho byl držák ložiska doplněn o výřez pro koncový spínač, který slouží k detekci krajní polohy pohybu a ochraně systému proti mechanickému dorazu.

Prototyp pohybového ústrojí osy Y byl navržen tak, aby vodicí tyče procházely pod nosnou deskou, která je zároveň svým tvarem objímala a tvořila s nimi jeden kompaktní celek. Montážní postup počítal s tím, že vodicí tyče se nejprve zasunou do jednoho z krajních držáků, následně se protáhnou tělem pohybového ústrojí a nakonec se fixují v protilehlém držáku. Tento způsob montáže zajišťoval správné zarovnání všech prvků a dostatečnou mechanickou stabilitu při lineárním pohybu.

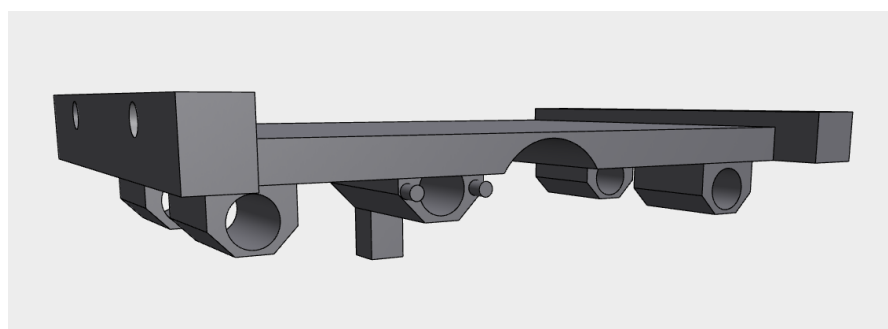
Spodní strana pohybového dílu byla vybavena prostorem pro uložení matice závitové tyče, která sloužila k převodu rotačního pohybu motoru na posuv desky. V původní verzi prototypu však nebyl použit žádný systém pro pevné uchycení této matice. Během testování bylo zjištěno, že pro zajištění alespoň základní funkčnosti postačuje dočasné fixování

pomocí lepicí pásky, což však samozřejmě nevyhovovalo dlouhodobému provozu ani nárokům na přesnost. Horní část prototypu měla tvar pravoúhlé desky s vybráním uprostřed o rozměrech 10 × 8 cm, které odpovídalo plánované pracovní ploše. Do tohoto zahlobení bylo možné vložit obrobek (např. DPS), avšak ani v této fázi návrhu nebylo počítáno s žádným systémem pro jeho pevné uchycení. Tato absence uchycení představovala jeden z hlavních konstrukčních nedostatků, které bylo nutné vyřešit při přechodu k finální verzi.

Ve finálním návrhu došlo k několika konstrukčním úpravám s cílem zvýšit funkčnost a uživatelský komfort. Pracovní plocha byla mírně rozšířena na šířku o 10 mm, aby kompenzovala výrobní tolerance desek dodávaných bez přesně garantovaných rozměrů. Celá horní plocha byla navíc uložena níže vůči rámu zařízení, čímž se snížilo těžiště pohybující se části a zlepšila se stabilita při obrábění.

Pro uchycení obrobku byl přidán jednoduchý, ale funkční upínací systém. Levá strana pracovní plochy (při pohledu zepředu) byla opatřena malou pevnou hranou, o kterou se obrobek mohl opřít. Pravá strana byla konstrukčně rozšířena a obsahovala kapsu pro matici s vnitřním závitem, do které bylo možné zašroubovat fixační šrouby. Tento systém umožnil rychlé a spolehlivé zajištění desky vůči posunu. Přední a zadní hrany pracovní plochy byly naopak zcela odstraněny, aby bylo umožněno vložení obrobků větší délky, než je standardní pracovní prostor.

Na spodní straně pohybového ústrojí byl vytvořen tvarově přizpůsobený protikus, který pevně fixoval matici závitové tyče. Pro zajištění dlouhodobé mechanické spolehlivosti byla použita fixace lepidlem, která brání samovolnému uvolnění spoje během delšího provozu. Pro instalaci matice, a možnost pohybu po celém rozsahu osy, byl na spodní stranu přidán kruhový výřez, který pojmul jak průměr matice, tak průměr pružné spojky motoru a závitové tyče. V neposlední řadě byl na spodní část přidán výběžek, jehož účelem je zajištění spolehlivého kontaktu s koncovým spínačem. Na následujícím snímku můžeme vidět finální podobu 3D modelu pracovní plochy.



Obrázek 29 - Finální 3D model pracovní plochy [Autor]

Prototyp osy X konstrukčně vycházel z návrhu osy Y, přičemž zachovával shodný způsob uchycení k rámu zařízení. Oproti ose Y však byly držáky doplněny o horní uchycení, které

zajišťuje vyšší tuhost celé sestavy. Toto zesílení bylo nezbytné, neboť na osu X působí větší mechanické zatížení, protože nese celou hmotnost vřetena a pohyblivou sestavu osy Z.

Z hlediska principu zůstává uspořádání obou os obdobné, liší se však orientací a zatížením. Zatímco osa Y zajišťuje pohyb pracovní desky, na ose X se pohybuje kompletní sestava osy Z. Tím se kladou vyšší nároky na přesnost a tuhost její konstrukce, zejména v oblasti vedení a uchycení krokového motoru.

Finální podoba osy X se od prototypu v zásadě neliší v konstrukčních principech, byly však provedeny dílčí úpravy s cílem zlepšit vizuální integraci do celého zařízení a zvýšit mechanickou odolnost některých částí. Vzhled držáků byl upraven tak, aby lépe korespondoval s designem ostatních konstrukčních celků.

Na držák s ložiskem byla nově přidána úzká drážka, určená pro usazení koncového spínače, který slouží jako referenční bod pro inicializaci pohybu osy a její nulování.

Držáku krokového motoru se dostalo mírných tvarových změn, především za účelem sjednocení vzhledu s ostatními částmi zařízení. Zásadnější změnou však bylo zesílení stěny, která drží samotný motor a zároveň i uchycení vodících tyčí. Toto zesílení bylo provedeno za účelem zvýšení dlouhodobé mechanické odolnosti, a tím i spolehlivosti celé konstrukce při opakovaném zatížení.

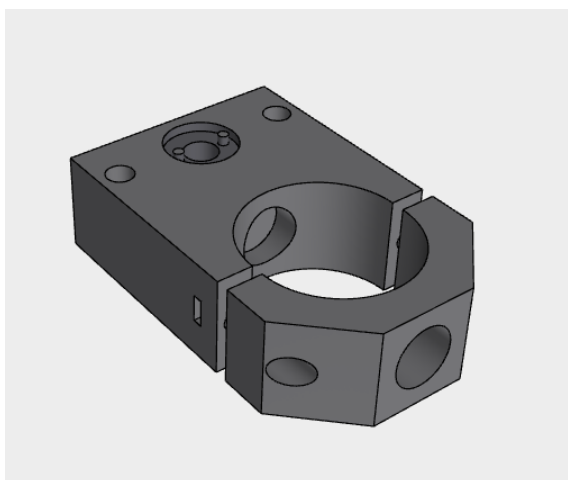
Svislá osa zařízení, tedy osa Z, byla zkonstruována jako sestava založená na jednoduchém pravoúhlém kvádru, který plní funkci nosné konstrukce pro pohybový mechanismus. Boční stěny tohoto kvádru byly opatřeny pravidelně rozmístěnými otvory, jež přesně odpovídaly průměrům vodících a závitových tyčí osy X. Tato konstrukce zajišťovala přesné a stabilní vedení při všech pracovních pohybech v ose Z.

V horní části kvádru byly vytvořeny dva horizontální převisy. Spodní z nich sloužil k podepření vodících tyčí a současně obsahoval uložení pro závitovou tyč, která zajišťovala vertikální pohyb vřetena. Horní převis pak sloužil jako montážní plocha pro krokový motor, jenž byl mechanicky přímo spojen se závitovou tyčí. Tento způsob přenosu rotačního pohybu umožňuje přesné řízení výškové polohy vřetena pomocí softwaru.

Samotné upínací ústrojí pro vřeteno, tedy jeho mechanické uchycení k ose Z, bylo navrženo jako dvoudílná sestava. Oba díly tvořící držák byly konstruovány tak, aby mezi ně bylo možné vřeteno přesně vložit a následně pevně stáhnout pomocí šroubů a matek z obou stran. Tvar vnitřní objímky byl důkladně přizpůsoben profilu těla vřetena – především jeho případným prolisům či nerovnostem – aby došlo k mechanickému zajištění proti pootočení či vyklouznutí. Tím bylo dosaženo pevného uchycení i bez použití dalších fixačních prvků.

Spodní část držáku byla navíc opatřena přesně tvarovaným lůžkem (protikusem) pro matku závitové tyče, která zajišťuje převod rotačního pohybu krokového motoru na lineární posun celé sestavy v ose Z. Matice byla do držáku vložena tak, aby její poloha byla stabilní díky vlastní váze vřetena a přesnému lícování ve vybrání. Pro zvýšení provozní spolehlivosti a

eliminaci možného uvolnění během delšího používání byla matka v držáku fixována pomocí lepidla, čímž bylo zajištěno její trvalé a pevné uchycení bez nutnosti další mechanické aretace. Následující obrázek je fotografie 3D modelu osy Z a držáku pro vřeteno.



Obrázek 30 - Finální 3D model držáku pro vřeteno [Autor]

7.4 Software

Pro správnou funkci CNC frézky bylo nutné využít tři základní softwarové prvky, jeden pro řídicí jednotku, druhý pro počítačové ovládání a třetí pro generování výrobních dat.

Řídicí jednotka, tedy Arduino Uno, potřebovala firmware, který dokázal interpretovat příkazy v jazyce G-kód a převádět je na řízení jednotlivých os. Pro tento účel byl použit firmware GRBL, který je široce rozšířený a optimalizovaný právě pro malé CNC stroje.

Na straně počítače bylo nutné použít vhodný ovládací software, který umožňoval odesílání G-kódu do zařízení a monitorování jeho stavu. Pro tuto úlohu byl zvolen program Universal G-code Sender (UGS), který poskytoval uživatelsky přívětivé rozhraní a plnou kompatibilitu s GRBL. Tento program navíc umožňoval trasování cest z bitmapy nebo JPG obrázku. Tato funkce dokáže plně nahradit třetí součást a celý proces tím zjednodušuje, protože v programu je také vidět aktuální pracovní plocha zařízení. Tím se zmenšuje náchylnost na chybu v návrhu celého procesu.

Třetí součástí bylo využití softwaru pro generování G-kódu z návrhu plošného spoje. Uživatel do tohoto programu nahrál návrh desky, kterou chtěl frézovat (typicky ve formátu Gerber nebo DXF), a software automaticky vytvořil sadu instrukcí ve formátu G-kód. Tento G-kód obsahoval přesné trajektorie nástroje a technologické parametry potřebné k výrobě desky.

V následujících kapitolách je podrobně popsán postup nahrání firmware do Arduina a způsob ovládání zařízení z počítače.

7.4.1 Software řídicí jednotky

Pro řízení CNC frézky byl zvolen firmware GRBL, který umožňoval snadné ovládání krokových motorů pomocí G-kódu. GRBL byl nahrán do mikrokontroléru Arduino Uno. Proces nahrávání softwaru probíhal následovně. Nejprve bylo potřeba stáhnout aktuální verzi GRBL ze stránky oficiálního repozitáře na platformě GitHub. Poté byla složka s GRBL soubory přidána do prostředí Arduino IDE jako nová knihovna, a to pomocí volby „Přidat .ZIP knihovnu...“. Po úspěšném přidání knihovny byl v Arduino IDE otevřen příklad s názvem grblUpload, který se nacházel v sekci Soubor → Příklady → grbl. Tento soubor obsahoval jednoduchý program, jehož jediným úkolem bylo nahrát kompletní firmware GRBL do paměti mikrokontroléru.

Před samotným nahráváním bylo nutné vybrat správný typ desky (Arduino Uno) a správný port COM, ke kterému bylo Arduino připojeno. Poté bylo možné program zkompilovat a nahrát pomocí tlačítka „Nahrát“.

Po úspěšném nahrání bylo Arduino připraveno přijímat příkazy v jazyce G-kód a řídit připojené krokové motory prostřednictvím driverů A4988. Funkčnost GRBL byla ověřena připojením k počítači pomocí kompatibilního CNC kontrolního softwaru, GRBL Panel, což je počítačový software přesně navržený pro tuto aplikaci, který byl použit pro otestování pohybů. GRBL Panel je zastaralý a schází mu možnosti, které nabízí software od jiných výrobců. [28]

7.4.2 Komunikační software s řídicí jednotkou

Pro odesílání G-kódu do řídicí jednotky CNC frézky byl použit software Universal G-code Sender (UGS). Tento program slouží jako prostředník mezi počítačem a firmwarem GRBL nahraným v Arduino Uno.

Universal G-code Sender umožňuje uživateli otevřít soubor obsahující G-kód, zobrazit jeho strukturu a následně jej odesílat řádek po řádku do řídicí jednotky. Program také umožňuje ruční ovládání jednotlivých os, nastavení nulové pozice pracovního prostoru a monitorování aktuálního stavu zařízení.

Samotný přenos G-kódu probíhá přes sériovou linku (USB připojení). Počítač vysílá jednotlivé instrukce kódu jako textové řetězce, které GRBL interpretuje a převádí na přesné pohyby krokových motorů. UGS automaticky spravuje rychlost přenosu tak, aby nedošlo k zahlcení paměti Arduina – nové příkazy jsou odesílány až poté, co řídicí jednotka potvrdila dokončení předchozího příkazu.

Software dále nabízí funkce, jako jsou pozastavení a obnovení běhu programu, ruční nastavení posuvů, kontrolu aktuální polohy stroje a sledování případných chyb během přenosu. To značně usnadňovalo práci a zvyšovalo bezpečnost při obsluze CNC frézky.

Universal G-code Sender byl zvolen díky své jednoduchosti, stabilitě a plné kompatibilitě s GRBL. Jeho rozhraní bylo intuitivní i pro méně zkušené uživatele, což výrazně urychlilo proces uvádění frézky do provozu.[36]

7.4.3 Nastavení parametrů řídicí jednotky

Vzhledem k tomu, že GRBL je univerzální open-source firmware určený k řízení CNC zařízení různých typů, je nezbytné jeho nastavení přizpůsobit konkrétní aplikaci. GRBL nabízí širokou škálu konfiguračních možností, avšak během testování se objevil specifický problém, který bylo nutné prioritně vyřešit.

GRBL standardně podporuje softwarové řízení vřetena, včetně jeho zapínání a plynulé regulace otáček prostřednictvím PWM signálu. V navrženém řešení však bylo použito samostatné vřeteno, které je ovládáno zcela nezávisle – tedy manuálně, mimo řídicí elektroniku. Přesto bylo v základní konfiguraci GRBL řízení vřetena aktivní a využívalo digitální pin 11, jenž byl na použitý CNC shield zároveň připojen ke koncovému spínači osy Z. V tomto stavu byl tedy vstup od koncového spínače nefunkční.

Řešení vyžadovalo zásah do zdrojového kódu GRBL. Při analýze bylo v kódu nalezeno odpovídající místo s komentářem, který upozorňoval na konflikt funkce pinu 11 a nabízel možnost jeho deaktivace v případě, že řízení vřetena není potřeba. Po zakomentování příslušného řádku ve firmwaru byla kolize odstraněna a všechny koncové spínače začaly správně fungovat.

Po základní konfiguraci firmwaru následovalo nastavení v uživatelském softwaru Universal G-code Sender (UGS), který slouží jako rozhraní pro komunikaci s GRBL. Po spuštění zařízení a navázání spojení s řídicí jednotkou byl aktivován režim externího řízení pohybů a spuštěn základní konfigurační průvodce. UGS nabízí rozsáhlou škálu nastavení, z nichž většina byla ponechána v defaultní podobě, jelikož se netýkala konkrétních požadavků dané aplikace. Pro prvotní spuštění a ověření základní funkčnosti byl použit integrovaný Setup Wizard, který umožňuje uživatelsky přívětivým způsobem nastavit klíčové parametry, jako je aktivace koncových spínačů, invertování směru otáčení motorů nebo nastavení rozsahů jednotlivých os. Tato konfigurace prostřednictvím průvodce sloužila především k rychlému zprovoznění systému a jednotlivé parametry budou podrobněji rozebrány v dalších částech dokumentace.

Prvním upraveným parametrem byl \$0, který definuje délku řídicího pulzu (step pulse time), odesílaného z Arduina na motorový driver. Ačkoliv změna tohoto nastavení nebyla bezpodmínečně nutná, úprava hodnoty přispěla ke snížení mechanických vibrací během pohybu a tím i ke kultivovanějšímu chodu zařízení.

Dalším upraveným parametrem byl \$3, Direction Port Invert Mask, který umožňuje změnu směru otáčení motorů. Výchozí hodnota byla nastavena na 0, což odpovídá přímému směru u všech os. Tato hodnota byla změněna na 7, čímž došlo k invertování všech tří os (X, Y, Z). Výsledkem bylo intuitivnější ovládání zařízení z rozhraní UGS, kde odpovídá směr tlačítek a reálný pohyb stroje.

Parametry \$20 (Soft limits) a \$21 (Hard limits), které byly blíže popsány v kapitole věnované elektronice řídicí jednotky, byly během počátečního nastavování zařízení oba aktivovány. Cílem bylo zajistit jak softwarové omezení pohybu na základě definovaných souřadnic, tak i fyzické omezení pomocí koncových spínačů. Během testovacího provozu se však projevil

problém spojený s elektromagnetickým rušením, generovaným zapnutím vřetena. V okamžiku jeho spuštění docházelo k neoprávněné aktivaci koncového spínače, což způsobovalo vyvolání chybového stavu, jako by došlo k mechanickému dorazu. Prvním krokem při hledání řešení bylo přenastavení logiky koncových spínačů z výchozího režimu NO (Normally Open) na NC (Normally Closed), a přehození parametru \$5, který změní logiku snímačů i v jednotce. V tomto zapojení je spínač ve výchozím stavu sepnutý, a přerušení obvodu je interpretováno jako aktivace. Tato změna sice částečně omezila vliv rušení, ale její účinnost byla spolehlivá pouze tehdy, pokud se vřeteno fyzicky nenacházelo v blízkosti spínačů.

Jako nejefektivnější se nakonec ukázalo deaktivování parametru \$21 (Hard limits), čímž bylo zařízení zbaveno závislosti na fyzických spínačích a ponecháno pouze s aktivními softwarovými limity (\$20). Po korektně provedeném homingu a při správném nastavení rozměrů pracovního prostoru a odpovídajícím řízení pohybu to nepředstavovalo žádné omezení z hlediska bezpečnosti ani funkčnosti.

Parametry \$22 až \$27 se vztahovaly k nastavení homing procesu, tedy referenčního najetí zařízení do výchozí polohy. Homing probíhal sekvenčně, přičemž jako první se pohybovala osa Z, dokud nedošlo k sepnutí příslušného koncového spínače. Následně stejným způsobem proběhla detekce výchozí polohy os X a Y. Po úspěšném dokončení celého cyklu zařízení vrátilo zprávu "ok", což značilo správné provedení operace a vynulování strojních souřadnic. Tímto krokem si zařízení nastavilo tzv. strojní nulu, od které pak odvozovaly maximální povolené limity pohybu v jednotlivých osách. Právě tyto limity definovaly prostor, ve kterém se zařízení mohlo pohybovat, aniž by narazilo na softwarové omezení. Homing byl aktivován parametrem \$22, který musel být nastaven na hodnotu 1. Parametr \$23, Homing Direction Invert Mask, pak určoval směr pohybu motorů během homingu. Pro správnou funkci bylo nutné tento směr upravit tak, aby všechny osy směřovaly ke svým koncovým spínačům. Výchozí hodnota 0 byla změněna na 7, což odpovídá invertování všech tří os.

Dalším důležitým parametrem byl \$25, který určuje rychlost homingu, konkrétně rychlost nájezdu (seek). Rychlost byla mírně snížena, což vedlo ke ztišení chodu a umožnilo pečlivější sledování průběhu cyklu. Posledním upraveným parametrem byl \$27, Homing Switch Pull-off Distance, jenž definuje, o jakou vzdálenost se osa po homingu odtáhne zpět od koncového spínače. Tato hodnota byla zvýšena z 1 mm na 1,6 mm, aby bylo možné jemněji pracovat s hloubkou frézování na ose Z, a zároveň eliminovat možné chyby detekce způsobené mechanickými vůlemi.

Pro nastavení rozlišení jednotlivých os sloužily parametry \$100 až \$102, přičemž každý z nich odpovídal jedné konkrétní ose, X, Y a Z. Tyto parametry určovaly, kolik kroků musel vykonat krokový motor, aby došlo k posunu osy o 1 mm. Pro výpočet správných hodnot bylo využito rozhraní Setup Wizardu v programu UGS, který obsahuje integrovanou kalkulačku, která usnadnila výpočet na základě konkrétní mechaniky zařízení. Uživatel si totiž mohl zvolit vodící a závitové tyče s různým stoupáním či rozměry, a tomu bylo nutné přizpůsobit také softwarové nastavení. Postup kalibrace probíhal následovně: nejprve byla v softwaru vynulována aktuální poloha zařízení, a následně byla zvolena osová vzdálenost

posunu, obvykle 1 mm. Zařízení provedlo pohyb v daném směru a výsledná skutečně uražená vzdálenost byla změřena fyzicky. Tato hodnota byla následně zadána do kalkulačky, která podle rozdílu mezi požadovanou a skutečnou vzdáleností automaticky navrhla upravenou hodnotu kroku/mm, buď vyšší, nebo nižší. Pro dosažení maximální přesnosti bylo měření a kalibrace opakováno několikrát, čímž se minimalizovaly chyby způsobené vůlemi, mechanickou nepřesností nebo chybným odečtem.

Parametry \$110 až \$112 sloužily k definování maximální rychlosti pohybu jednotlivých os v jednotkách mm/min. Každý z těchto parametrů odpovídal jedné ose, tedy \$110 pro osu X, \$111 pro osu Y a \$112 pro osu Z. Původní výchozí hodnota, nastavená na 500 mm/min, byla pro účely testování snížena na 300 mm/min. Toto omezení rychlosti bylo zavedeno z několika důvodů: jednak pro minimalizaci opotřebení vrtacího nástroje, a dále pro usnadnění vizuální kontroly průběhu pohybu. Pomalejší posuv umožnil lépe identifikovat případné chyby v nastavení nebo konstrukčních detailech zařízení, a přispěl tak k bezpečnějšímu a přesnějšímu provozu během ladění systému.

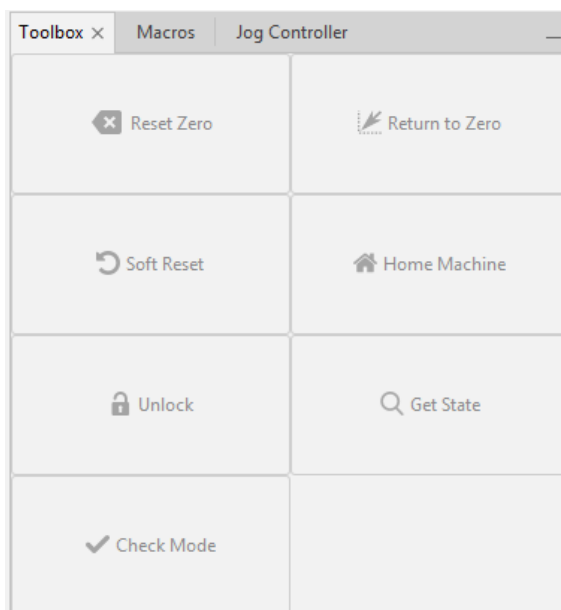
Poslední fází konfigurace bylo nastavení maximálních pracovních rozsahů jednotlivých os, tedy největší možné vzdálenosti, kterou se mohla každá osa posunout od strojní nuly. Tato omezení byla definována parametry \$130 až \$132, přičemž každý z nich odpovídal jedné ose, konkrétně \$130 pro osu X, \$131 pro osu Y a \$132 pro osu Z. Zadané hodnoty odrážely reálné rozměry pracovní plochy zařízení. Pro osu X byl rozsah nastaven na 110 mm, pro osu Y na 85 mm a pro osu Z na 7 mm. Tyto limity slouží nejen k softwarovému omezení pohybu mimo fyzické hranice stroje, ale také k ochraně před mechanickým poškozením a chybám při řízení trajektorie nástroje.[32]

8 Návod k obsluze

Fréza je kompletní zařízení, do kterého stačí nahrát připravený program a následná operace proběhne dle očekávání. Aby však bylo zajištěno její správné a bezpečné používání, je nezbytné, aby obsluha byla odpovídajícím způsobem proškolená. Tento návod se zaměřuje výhradně na obsluhu zařízení a nezabývá se návrhem desky plošných spojů ani přípravou G-kódu podle konkrétního návrhu uživatele. Proces vytváření G-kódu je popsán v předchozí kapitole věnované výrobě DPS.

Prvním krokem při uvedení zařízení do provozu je připojení řídicí jednotky k počítači. Tento úkon je nezbytný pro navázání komunikace a pozdější ovládání celého systému. Aby bylo zajištěno bezproblémové a bezpečné fungování, musí řídicí jednotka před přivedením napájení ke krokovým motorům nejprve projít inicializačními procedurami, které zajistí její připravenost k provozu. Po fyzickém připojení jednotky k počítači prostřednictvím USB rozhraní proběhne automatická inicializace zařízení a dojde k aktivaci sériového komunikačního kanálu, kterým bude nadále probíhat výměna dat mezi řídicí jednotkou a obslužným softwarem. Na počítači je následně spuštěn program Universal G-code Sender (UGS). V jeho rozhraní je třeba vybrat správný USB port, ke kterému je zařízení připojeno, a kliknutím na ikonu „Connect“ navázat spojení. Tím je komunikace navázána a zařízení je připraveno k dalšímu ovládání.

Po navázání spojení v softwaru Universal G-code Sender (UGS) se v sekci Controller State nejprve zobrazí zelená indikace s nápisem „CONNECTED“, která potvrzuje úspěšné připojení zařízení. Krátce poté se však zobrazí červená výstražná zpráva „ALARM“, která značí, že zařízení dosud nemá definovanou strojní nulu. Tento stav je běžný a očekávaný, protože osy mohl uživatel posunout i nedopatřením ručně, když bylo zařízení vypnuté. Zařízení se z bezpečnostních důvodů automaticky uzamkne do nehybného režimu, dokud není provedena inicializace polohového systému. Pro uvolnění tohoto zablokovaného stavu je nezbytné spustit homing proces, jehož princip a konfigurace byly popsány výše v kapitole Struktura a řízení komunikace. Než však bude homing zahájen, je důležité se nejprve ujistit, že ve vřetenu není upnutý žádný nástroj. Během referenčního pohybu zařízení totiž osy projíždějí až ke svým krajním mechanickým limitům, a zejména osa Z se v tomto procesu pohybuje výrazně směrem dolů, což by v kombinaci s upnutým nástrojem mohlo vést ke kolizi s konstrukcí osy Y. Homing lze vyvolat dvěma způsoby, buď kliknutím na ikonu domku v sekci Toolbox, nebo odesláním příkazu \$H přes sériovou komunikaci. Po úspěšném dokončení procesu zařízení po sériové lince odešle zprávu „ok“ a v sekci Controller State se zobrazí zelený stav „IDLE“, který signalizuje, že zařízení je v klidovém režimu a připraveno přijímat další pokyny od uživatele. V sekci Toolbox se nachází více ovládacích prvků, na následujícím snímku je vidět jeho podoba, pro snazší orientaci v textu.

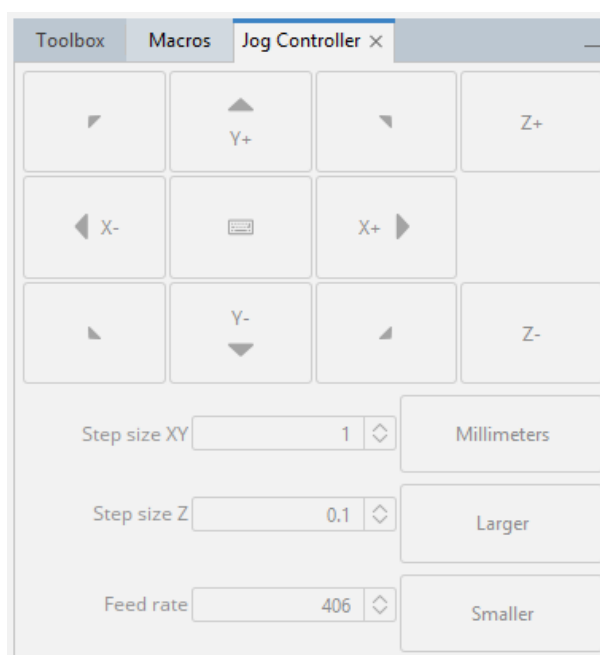


Obrázek 31 - Snímek Toolboxu v programu UGS [Autor]

Při prvním spuštění zařízení je vhodné provést definování pracovní nuly, tedy výchozího bodu, od kterého bude řízen celý obráběcí proces. Tato pracovní nula nesmí být zaměňována se strojní nulou, jelikož její poloha by v takovém případě kolidovala s konstrukčními částmi, zejména s pohybovým aparátem osy Y, což by mohlo vést k mechanickému konfliktu během zpracování. V prostředí UGS je třeba přepnout do krokového režimu (záložka Jog Controller) a pomocí ovládacích prvků přesunout vřeteno do bezpečné pozice mimo kolizní zónu, nejlépe do levého horního rohu obráběné desky. Jakmile je vřeteno ve zvolené výchozí poloze, je nutné v sekci Toolbox kliknout na tlačítko „Reset Zero“, čímž dojde k nastavení aktuální polohy jako pracovní nuly.

Na osu Y je následně upevněna obráběná deska. Nejprve je nutné povolit zajišťovací šrouby natolik, aby bylo možné desku volně usadit tak, aby rovnoměrně dosedla na pracovní plochu osy Y. Po usazení je vhodně desku shora lehce přitlačit, aby během dotahování nedošlo k jejímu prohnutí vlivem napětí v upínacích bodech. Zajišťovací šrouby se poté dotáhnou tak, aby byla deska pevně fixována ve všech směrech a nebylo možné s ní manuálně pohnout. Je však nutné dbát na to, aby šrouby nebyly nadměrně dotaženy, jelikož by mohlo dojít k nechtěnému deformování nebo poškození materiálu desky.

Jakmile je obráběná deska pevně zajištěna, přistupuje se k upnutí nástroje do vřetena. Vzhledem k tomu, že po dokončení homingu jsou všechny osy v krajních pozicích, je nejprve nutné v krokovém režimu (Jog Controller) přesunout vřeteno do takové polohy, ve které bude možné nástroj pohodlně upnout. Volba samotného nástroje závisí na požadavcích uživatele, je však nezbytné zvolit kleštinu odpovídající průměru dříku nástroje, aby bylo zajištěno jeho bezpečné a přesné upnutí. Nástroj společně s kleštinou se následně vloží do vřetena a ručně přidrží ve správné poloze. Poté je nutné vřeteno přesunout pomocí osy Y přímo nad pracovní plochu desky, ideálně tak, aby špička nástroje byla ve výšce co nejblíže 0 mm nad povrchem desky. Této ideální polohy není vždy snadné dosáhnout, v některých případech to může být dokonce technicky nemožné. Přesné přiblížení však není nezbytné, protože případnou vzdálenost mezi nástrojem a deskou lze softwarově kompenzovat. Důležité ovšem je, aby byla tato mezera přesně změřena a zaznamenána, neboť bude potřeba při tvorbě G-Kódu. Na následujícím snímku můžeme vidět podobu Jog Controlleru.



Obrázek 32 - Snímek Jog Controlleru v programu UGS [Autor]

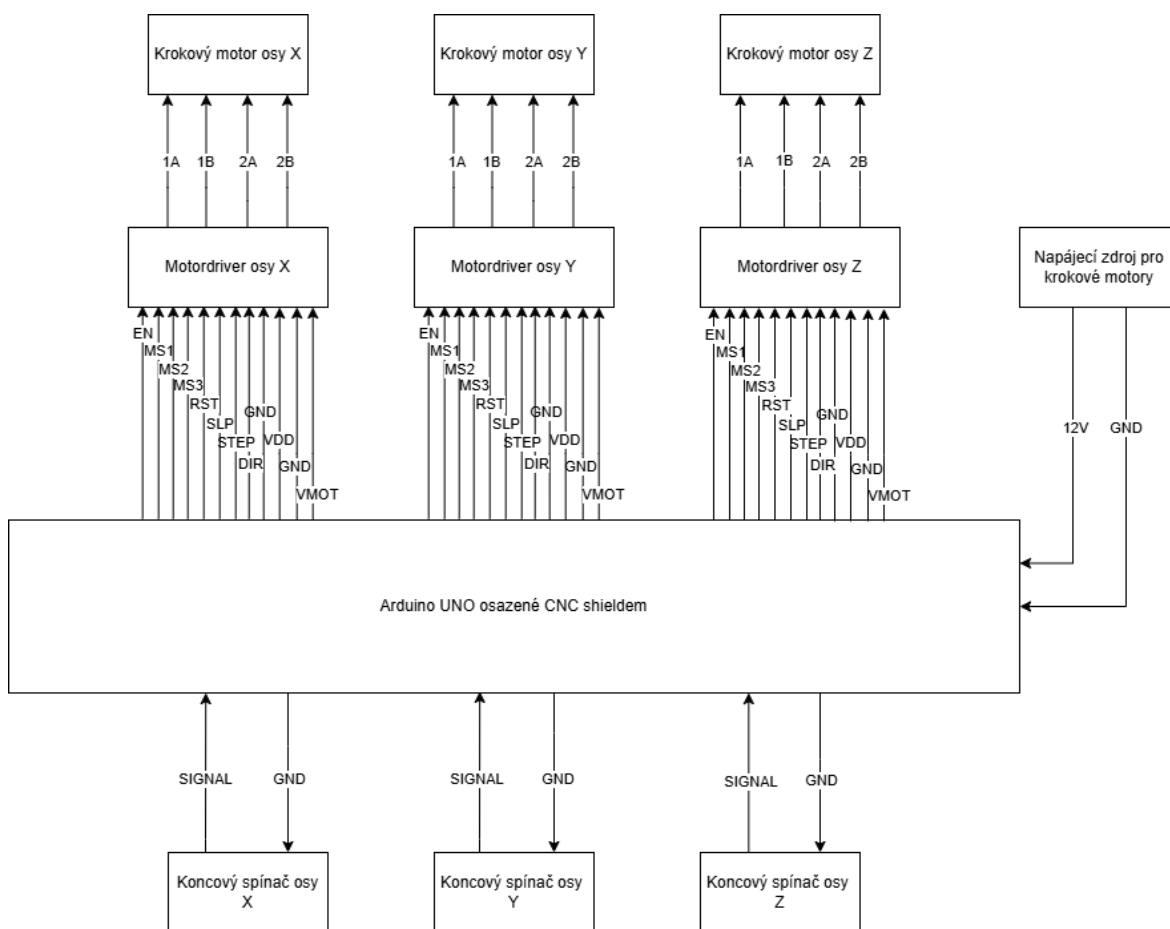
Zařízení je v tuto chvíli připraveno k provozu a lze přistoupit k nahrání G-kódu. Ještě před tím je však nutné uvést do provozu vřeteno, které funguje jako samostatný modul a spouští se nezávisle na řídicím softwaru. Zapíná se pomocí přepínače umístěného na zadní straně vřetena, kde uživatel zároveň nastaví požadované otáčky podle potřeby konkrétní operace. Po aktivaci vřetena je možné pokračovat v uživatelském rozhraní programu Universal G-

code Sender (UGS). Kliknutím na ikonu složky v levém horním rohu se otevře dialogové okno, které vyzve uživatele k výběru souboru s G-kódem. Po potvrzení výběru se načte daný soubor a zobrazí se v nové sekci programu, kde je možné zkontrolovat jeho obsah. V horní nástrojové liště, hned vedle ikony pro výběr souboru, se nachází tlačítko pro spuštění operace, které slouží ke zahájení odesílání instrukcí do zařízení. Po jeho stisknutí se systém přepne do režimu RUN a začne vykonávat jednotlivé kroky podle G-kódu, který je postupně odesílán z počítače do řídicí jednotky. Během zpracování lze proces kdykoliv dočasně pozastavit, čímž se zařízení přepne do režimu HALT. Následně je možné operaci znovu spustit, nebo ji zcela přerušit, čímž se systém vrátí do výchozího stavu IDLE. Všechny ovládací prvky pro tyto akce, spuštění, pozastavení i přerušování, jsou umístěny v blízkosti tlačítka pro spuštění operace.

V průběhu operace lze v konzoli sériové komunikace sledovat průběžnou zpětnou vazbu od zařízení. Po každém správně vykonaném příkazu se v konzoli zobrazí zpráva „ok“, která potvrzuje úspěšné zpracování dané instrukce. Po dokončení celé operace se vřeteno automaticky vrátí do pozice pracovní nuly, čímž se připraví na další cyklus. Zařízení se následně přepne do režimu IDLE, tedy do klidového stavu, ve kterém čeká na další pokyny od uživatele.

9 Schéma zapojení a jeho komponenty

9.1 Blokové schéma zapojení



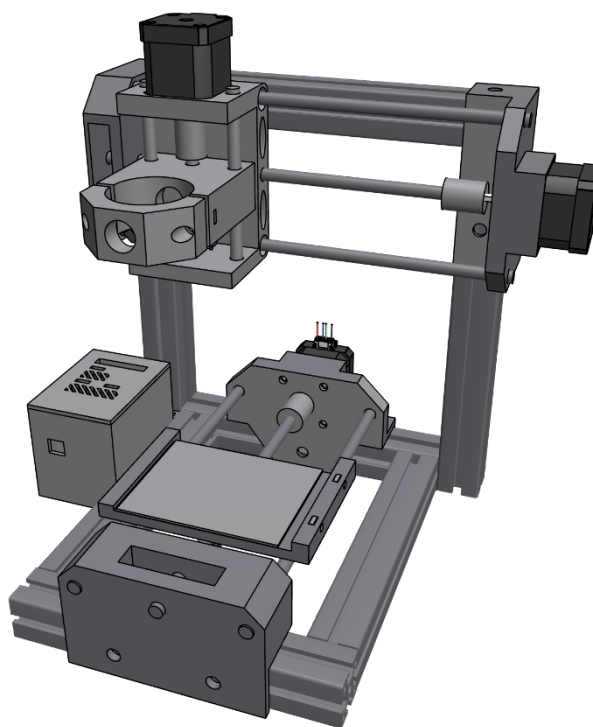
Obrázek 33 - Blokové schéma zapojení celého zařízení[Autor]

9.2 Seznam komponent

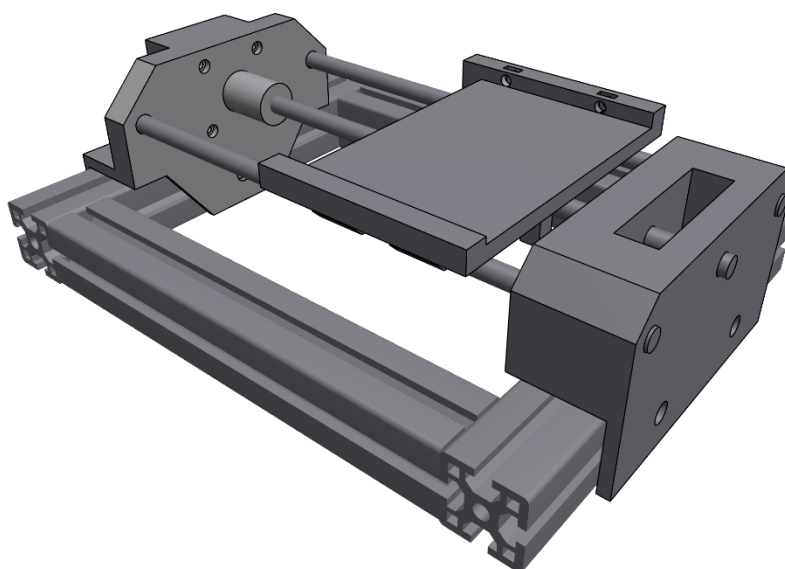
Tabulka 2 - Seznam použitých součástí a komponent

Komponenta	Specifikace	Funkce
Krokové motory	NEMA 17HE19-2004S	Pohon os X, Y a Z – řízení polohy
Ovladače motorů	A4988	Řídí proud do motorů a umožňují jemné pohyby
Vodící šrouby	TR8×2 mm (trapézový závit)	Převádí rotační pohyb motoru na lineární posuv
Vřeteno	GEKO G81220, 230V~ 50 Hz, 8000-325000 ot./min	Otáčení nástroje pro frézování mědi
Řídící deska	Arduino UNO CNC shield	Zpracování G-code a řízení pohybů
Napájení	Spínaný zdroj 12V 2,5A	Napájí krokové motory
Konstrukce	Hliníkové profily 3030 + plastové díly / 3D tisk	Rám stroje zajišťuje dostatečnou tuhost a přesnost
Lineární vedení	Lineární kovové tyče	Umožňují plynulý a přesný pohyb os
Software	GRBL firmware	Ovládání stroje a generování dráhy nástroje

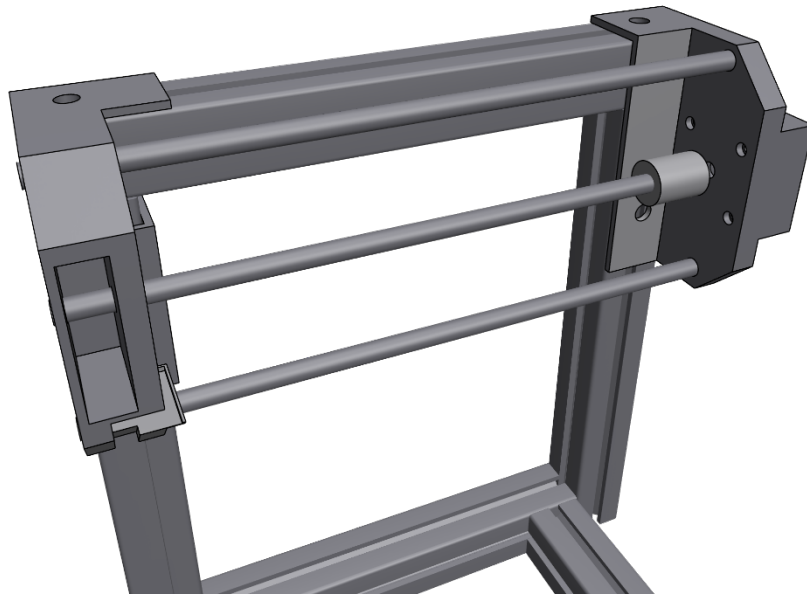
10 Finální 3D modely



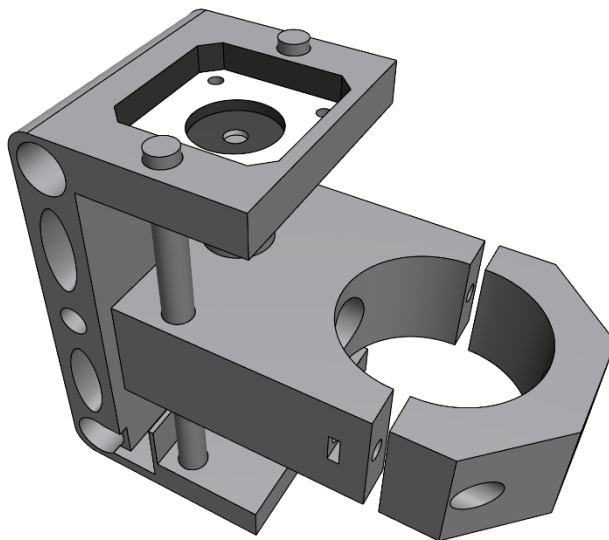
Obrázek 34 - Finální 3D model kompletního zařízení [Autor]



Obrázek 35 - Finální 3D model osy Y [Autor]



Obrázek 36 - Finální 3D model osy X [Autor]



Obrázek 37 - Finální 3D model osy Z [Autor]

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a realizací CNC frézky určené pro výrobu DPS. Cílem bylo navrhnout zařízení, které bude cenově dostupné a z běžně dostupných komerčních modulů, a přitom dostatečně přesné pro výrobu funkčních prototypů DPS.

V teoretické části byla nejprve rozebrána historie CNC zařízení a jejich základní rozdělení. Následně byly popsány klíčové konstrukční komponenty, z nichž se CNC frézka skládá, jako jsou krokové motory, motor drivery, řídicí jednotka a vřeteno. Dále byla vysvětlena práce s G-kódem, firmwarem GRBL a způsob komunikace mezi softwarovým a hardwarovým vybavením.

V praktické části práce byla navržena a sestavena konstrukce CNC frézky založená na hliníkových profilech, krokových motorech NEMA 17, závitových tyčích a držácích vytištěných z materiálu PLA pomocí 3D tiskárny. Elektroniku tvoří Arduino Uno, CNC shield a motor drivery A4988, které společně s firmwarem GRBL zajišťují řízení všech os.

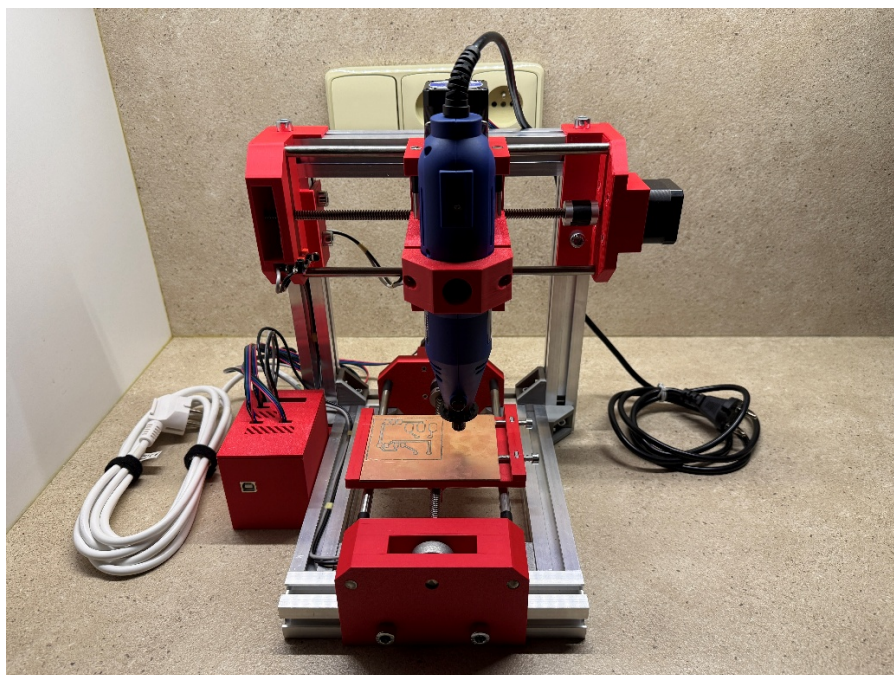
Ve finálním návrhu byla pracovní plocha rozšířena, a to z důvodu různorodých šířek dostupných desek DPS. Tato úprava přispěla k větší univerzálnosti a snadnější manipulaci s materiálem. Pro vřeteno bylo použito samostatné externí zařízení, které oproti běžně integrovaným řešením nabízí výrazně širší rozsah otáček. Díky tomu bylo možné překročit původně plánovaný otáčkový rozsah a zajistit lepší přizpůsobení obrábění konkrétním podmínkám.

Původně zamýšlená pracovní hloubka řezu činila přibližně 50 μ m, což by zajišťovalo odebrání pouze měděné vrstvy. V praxi se však ukázalo, že rovina povrchu desek není ideální a že celková konstrukce, zejména použití plastových držáků s nižší tuhostí a výrobní vůle v závitových tyčích, neumožňuje udržet konzistentní hloubku řezu po celé ploše. Z těchto důvodů byla pracovní hloubka řezu navýšena na 0,15 mm, čímž bylo zajištěno spolehlivé oddělení vodivých cest i v místech s výškovými odchylkami. Tento problém by bylo možné vyřešit integrací autoleveleru, který by kompenzoval výškové nerovnosti povrchu a umožnil přesnější vedení nástroje. Všechny výsledné parametry jsou shrnuty v následující tabulce.

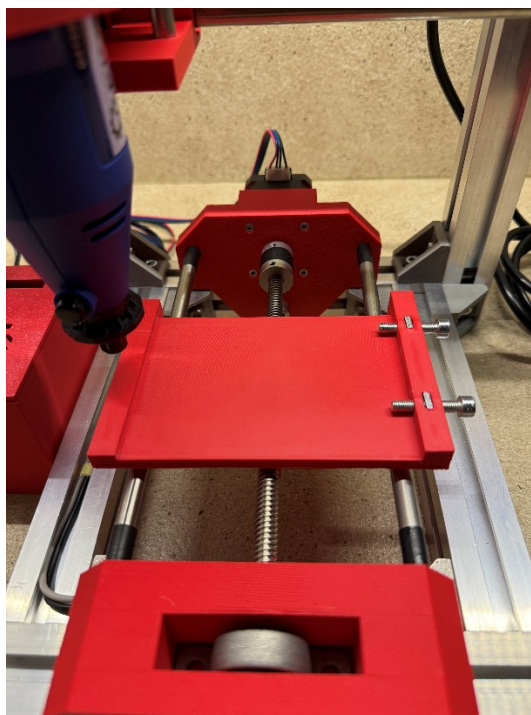
Tabulka 3 - Tabulka s dosaženými parametry

Parametr	Hodnota
Velikost pracovní plochy	110 × 80 mm (88 cm ²)
Rychlost otáček vřetena	8 000–32 500 RPM
Rychlost posuvu (X/Y)	300 mm/min
Přesnost pohybu	±0,1 mm
Rozlišení pohonů	0,00125 mm (Teoretické), 0,01-0,02 (efektivní)
Hloubka řezu (Z)	1,6 mm (maximální), 0,15mm (pracovní)

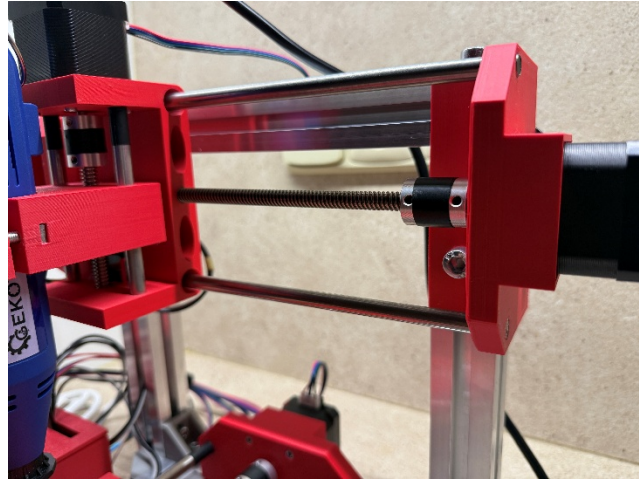
Finální vzhled zkompletovaného zařízení je vidět na následujících obrázcích.



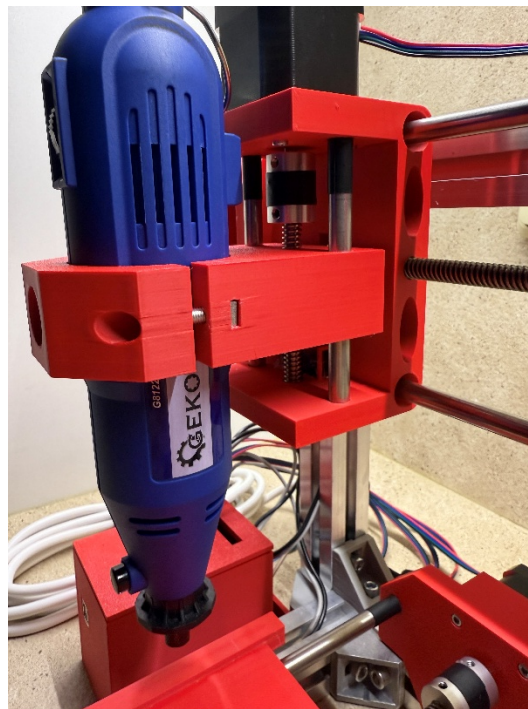
Obrázek 38 - Finální podoba kompletního zařízení [Autor]



Obrázek 39 - Finální vzhled osy Y [Autor]



Obrázek 40 - Finální vzhled osy X [Autor]



Obrázek 41 - Finální vzhled osy Z [Autor]

Použitá literatura

- [1 HARRISON, Noah. *CNC History: The Origination and Evolution of CNC Machining*. Online. RapidDirect. 2021. Dostupné z: <https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-history/>. [cit. 2025-05-07].
- [2 SUH, Suk-Hwan. *Theory and design of CNC systems*. Online. London: Springer, c2008.] ISBN 978-1-84800-336-1. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=c_-3TxZlnpMC&oi=fnd&pg=PR19&dq=CNC&ots=P_fVbQGSqH&sig=7CZQVLegPIZI8aGNggqHYxiZJ8x4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [cit. 2025-05-07].
- [3 AUTOR, Nenalezený. *Computer Numeric Control (CNC) Lathe*. Online. Public Domain Media Search Engine Public Domain Image. Dostupné z: <https://itoldya420.getarchive.net/media/computer-numeric-control-cnc-lathe-7b67a1>. [cit. 2025-05-07].
- [4 AUTOR, Nenalezený. *Close-Up Shot of CNC Lasers*. Online. Pexels. Dostupné z: <https://www.pexels.com/photo/close-up-shot-of-cnc-lasers-7254428/>. [cit. 2025-05-07].
- [5 PHILIPPE. *Battery holder for RC car*. Online. Wikimal. Dostupné z: <https://wiki.imal.org/project/battery-holder-rc-car>. [cit. 2025-05-07].
- [6 WANT.NET, Technický tým. *Víceosé obrábění: Jaký je mezi nimi rozdíl*. Online. Want.Net. Dostupné z: <https://want.net/cs/multiaxis-machining-whats-the-difference-between-them/>. [cit. 2025-05-07].
- [7 DEANS, Marti. *CNC Milling Coordinate System Made Easy*. Online. Fusion Blog. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/cnc-coordinate-system-made-easy/>. [cit. 2025-05-07].
- [8 3D HUBS. *CNC Machining: The complete engineering guide*. Online. Dostupné z: https://gab.wallawalla.edu/~ralph.stirling/classes/engr480/examples/nvx/NVX/Helpful%20Docs/CNC_Machining_The_Complete_Engineering_Guide.pdf. [cit. 2025-05-07].
- [9 JADES.CZ. *Tuhost CNC strojů*. Online. Kimla Czech. Dostupné z: https://www.kimla-czech.cz/technicke-informace/4.-tuhost-cnc-stroju/?utm_source. [cit. 2025-05-07].
- [1 IMBERA, Jakub. *Mechanical designer of prototypes*. Online. MDP.cz. Dostupné z: <https://mdp.cz/mdp/moje-cnc>. [cit. 2025-05-07].
- [1 AUTOR, Nenalezený. *Belt drive or lead screw*. Online. PBC Linear. Dostupné z: <https://pbcllinear.com/blog/2020/february/lead-screw-or-belt-drives>. [cit. 2025-05-10].

- [1 AUTOR, Nenalezený. *Ball Lead Screw With Nut*. Online. Indiamart.com. Dostupné z: 2] <https://www.indiamart.com/proddetail/ball-lead-screw-with-nut-19938789112.html>. [cit. 2025-05-07].
- [1 HRNČÍŘ, Jakub. *Krokový motor*. Online. ELUC. Dostupné z: 3] <https://eluc.ikap.cz/lekce/krokovye-motory>. [cit. 2025-05-07].
- [1 AUTOR, Nenalezený. *E Series Nema 17 Bipolar 55Ncm(77.88oz.in) 2A 42x42x48mm 4 Wires w/ 1m Cable*. Online. StepperOnline. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/e-series-nema-17-bipolar-55ncm-77-88oz-in-2a-42x42x48mm-4-wires-w-1m-cable-connector-17he19-2004s>. [cit. 2025-05-07].
- [1 *What is the difference between full-stepping, the half-stepping, and the micro-drive?* 5] Online. Automate. 2019. Dostupné z: <https://www.automate.org/motion-control/case-studies/what-is-the-difference-between-full-stepping-the-half-stepping-and-the-micro-drive>. [cit. 2025-05-07].
- [1 SVALE SKOGRUD, Simen. *GRBL*. Online. GitHub. 2023. Dostupné z: 6] <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Home>. [cit. 2025-05-07].
- [1 AUTOR, Nenalezený. *Thread: Spindle speeds for PCB milling*. Online. Nenalezený 7] vydavatel. Dostupné z: <https://www.cnczone.com/forums/uncategorised-metalworking-machines/1334-cnc.html>. [cit. 2025-05-08].
- [1 AUTOR, Nenalezený. *Nástroje pro dělení DPS*. Online. Interconti. 2024. Dostupné z: 8] <https://www.interconti.cz/aktuality/nastroje-pro-deleni-dps/>. [cit. 2025-05-08].
- [1 AUTOR, Nenalezený. *Printed Circuit Board Cutting Tools*. Online. KYOCERA 9] Precision Tools. Dostupné z: <https://www.kyoceraprecisiontools.com/pcb/>. [cit. 2025-05-07].
- [2 AUTOR, Nenalezený. *Tvorba DPS na gravírovací frézce*. Online. Mylms. 2018. 0] Dostupné z: <https://www.mylms.cz/tvorba-dps-na-gravirovaci-frezce/>. [cit. 2025-05-10].
- [2 PIVONKA, Lukáš. *Výroba DPS fotocestou*. Online. Elektronika, vývoj a web. Dostupné 1] z: <https://www.elcs.cz/elektronika/vyroba-dps>. [cit. 2025-05-08].
- [2 AUTOR, Nenalezený. *Fotomaska*. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: 2] https://www.elcs.cz/cms/elektronika/vyroba-dps/osvit/100_2063.JPG. [cit. 2025-05-07].
- [2 HORÁČEK, Oldřich. *Jak vyrobit plošný spoj pomocí laseru TOOCA L1?* Online. 3] Bastlírna HWKITCHEN. 2024. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitchen.cz/jak-vyrobite-plosny-spoj-laser-tooca-l1/>. [cit. 2025-05-08].

[3 ABELLA, John. *Make Magazine 3D Printer Shootout Weekend*. Online. Flickr. 7] Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/jabella/9427623943/>. [cit. 2025-05-07].

[3 WERK LEIPZIG, BMW. *Lackiererei: BMW Leipzig MEDIA 050719 Download*
8] *Lackiererei 2 max.jpg*. Online. Wikimedia Commons. Dostupné z:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BMW_Leipzig_MEDIA_050719_Download_Lackiererei_2_max.jpg. [cit. 2025-05-07].

[3 AZ COMPUTERS, Pavel Šára. *Ozubené řemeny HTD 5M 15*. Online. CNCShop.cz.
9] Dostupné z: <https://www.cncshop.cz/ozubene-remeny-htd-5m-15/pro899.html>. [cit. 2025-05-07].

[4 AZ COMPUTERS, Pavel Šára. *Ozubené řemenice HTD 5M 15*. Online. CNCShop.cz.
0] Dostupné z: <https://www.cncshop.cz/ozubene-remenice-htd-5m-15/pro881.html>. [cit. 2025-05-07].

Přílohy

A – CD

Příloha k bakalářské práci

CNC frézka pro výrobu plošných spojů

Martin Stárek

CD

OBSAH

1. Text Bakalářské práce ve formátu PDF
2. Zdrojový kód Arduino UNO
3. Knihovna ke zdrojovému kódu
4. 3D modely zařízení
5. Fotodokumentace